

Институт Инженеров Путей Сообщения.

627.9

К-19

Б. Н. КАНДИВА.

инженер путей сообщения,

профессор Института Инженеров Путей Сообщения и 1-го Петроградского Политехнического Института.

ВНУТРЕННИЕ ВОДЯНЫЕ СООБЩЕНИЯ.

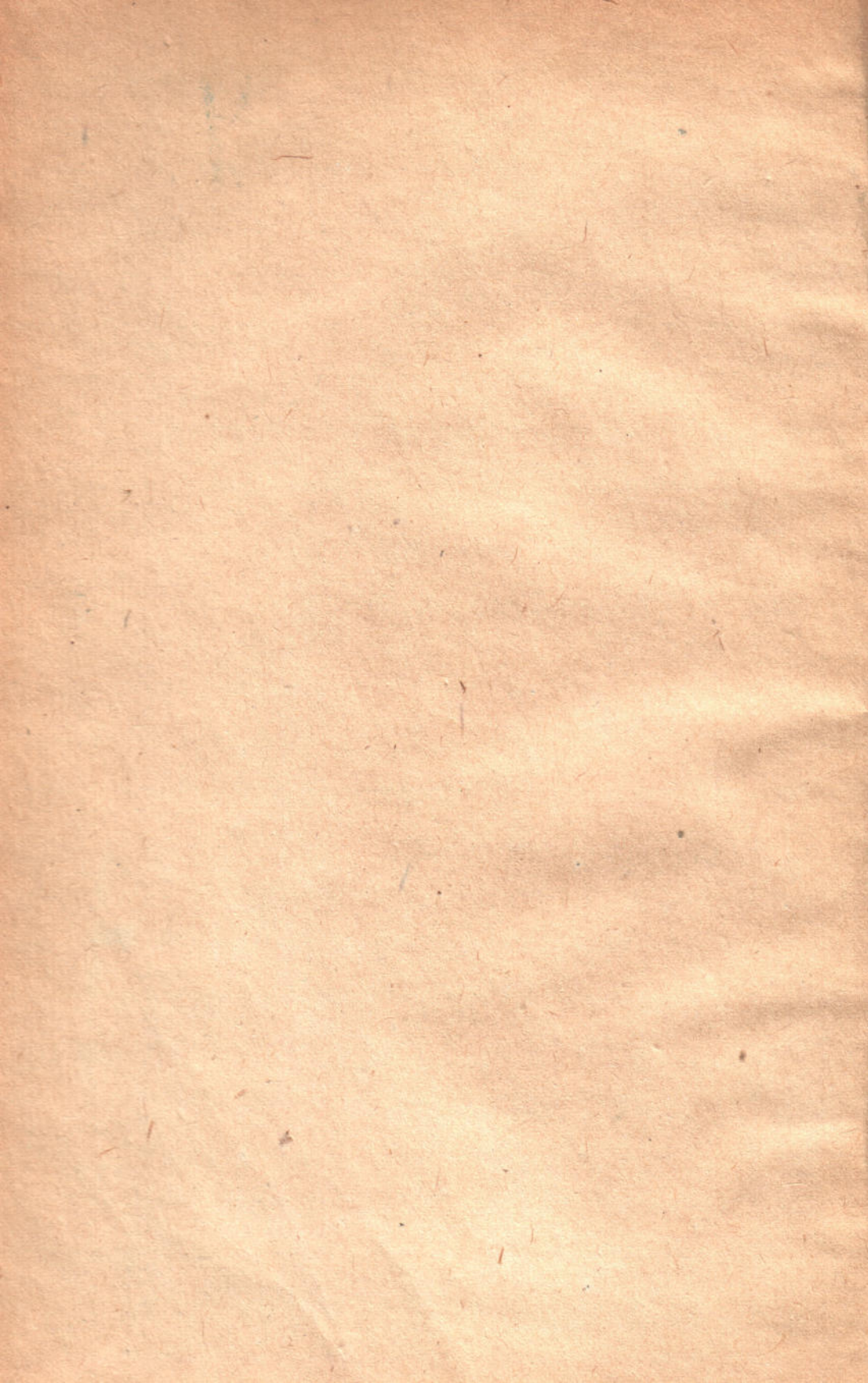
Выпуск 1-ый.

СВОЙСТВА РЕК В ЕСТЕСТВЕННОМ СОСТОЯНИИ.

ПЕТРОГРАД.

1922

2058



Институт Инженеров Путей Сообщения.

В. Н. КАНДИВА,

инженер путей сообщения,

профессор Института Инженеров Путей Сообщения и 1-го Петроградского Политехнического Института.

627.9

К-19.

ВНУТРЕННИЕ ВОДЯНЫЕ СООБЩЕНИЯ.

проверено
1966 г.

Выпуск 1-ый.

СВОЙСТВА РЕК В ЕСТЕСТВЕННОМ СОСТОЯНИИ.



О ПЕТРОГРАД.

1922.

Р. Ц. № 4048, гор. Петроград.

Типо-литография Петроградского Округа Путей Сообщения. Фонтанка, 117.

Отпечатано в количестве 3.000 экз.

ОГЛАВЛЕНИЕ.

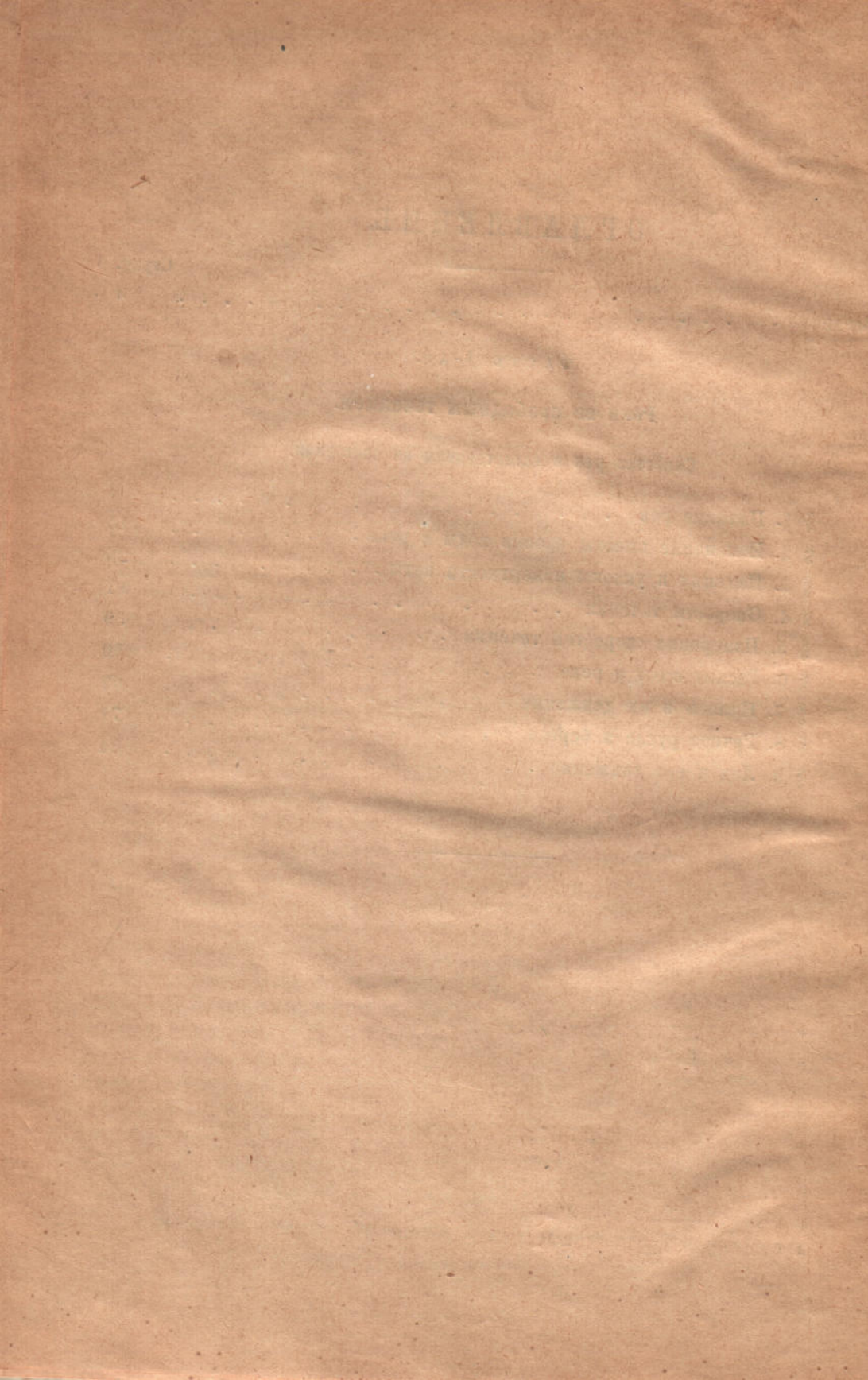
	Стран.
Введение	3

Часть I-ая.

Реки со свободным течением.

Свойства рек в естественном их состоянии.

§ 1. Питание рек	8
§ 2. Изменение высоты уровня воды в реке	15
§ 3. Падения и уклоны поверхности воды	26
§ 4. Скорости течения	31
§ 5. Измерение скоростей течения	39
§ 6. Расход воды в реке	50
§ 7. Наносы и их движение	62
§ 8. Речное русло и берега	71
§ 9. Лед и его движение	84



ВВЕДЕНИЕ.

Под общим названием внутренние водные пути сообщения понимаются все те реки, каналы и озера, которые естественно или благодаря принятым техническим мерам пригодны для передвижения по ним грузов и пассажиров. Понятию о внутренних водных сообщениях противопоставляются, таким образом, как сухопутные сообщения по разного рода дорогам, так и морские сообщения. Большие озера, по обширности их водной площади, по глубине, по силе волн и по другим явлениям, более сходны с морями, причем и судоходство на таких озерах носит более характер мореплавания, а возводимые на этих озерах сооружения сходны с морскими сооружениями. Поэтому, хотя такие озера и принадлежат, по существу, к внутренним водным путям, но в настоящем курсе не рассматриваются, так как сходные технические меры для удовлетворения потребностей морского транспорта рассматриваются в курсе портовых сооружений. По той же причине в настоящем курсе не рассматриваются технические меры, принимаемые в морских устьях рек с целью устройства и поддержания глубоководных фарватеров для морских судов, посещающих устьевые приморские порты.

В дальнейшем изложении курс внутренних водных сообщений разделен нами на три отдела: 1) реки со свободным течением, 2) канализованные реки и 3) каналы. Такое деление соответствует установившимся наименованиям — „естественные“ водные пути и „искусственные“ водные пути, причем под последними обыкновенно понимаются не только каналы, построенные на сухом месте, но и канализованные (шлюзованные) реки, т.-е. такие реки, которые в естественном состоянии не судоходны, а приведены в судоходное состояние искусственно помощью специальных для того сооружений.

Различие между естественными и искусственными водными путями вытекает из назначения последних и способов их образования.

Как известно, реки с самой глубокой древности и до нынешнего времени имели выдающееся значение для населения всех стран. Прорезая материк в разных направлениях и протекая на большие протяжения, реки являлись древнейшими путями сообщения и главными путями, по которым цивилизация проникала вглубь страны. Долгое время реками, как путями сообщения, пользовались лишь в естественном состоянии. Ничтожные, по сравнению с нынешними, количества

перевозимых товаров и малые размеры судов еще не предъявляли рекам таких требований, которым они не удовлетворяли бы без каких-либо искусственных сооружений. Естественным состоянием рек пользовались не только для местных сношений и местного обмена товаров, но даже и для транзитного движения на весьма далекие расстояния, например от одного моря до другого. При этом приходилось пользоваться уже не одной рекой, а переходить из бассейна одной реки в бассейн других рек.

Естественные препятствия в реках, как, например, пороги, перекаты, мелководье верховьев рек и даже водоразделы между бассейнами рек не останавливали транзитного движения в эту первобытную эпоху внутренних и международных торговых сношений.

Для перехода через такие препятствия производилась или отгрузка судов или перегрузка товаров на плоты; перевозили товары в этих местах сухопутьем или даже вытаскивали суда на берег и танули их волоком в обход препятствия и через водоразделы.

Таким был известный в истории древней Руси великий водный путь между Балтийским и Черным морями, „из Варяг в Греки“, которым пользовались норманы для сношений с Византией. На своих легких лодках они проникали из Финского залива по р. Неве, Ладожскому озеру и реке Волхову в озеро Ильмень и далее вверх по р. Ловати; затем перетаскивали лодки волоком через водораздел в р. Днепр, по которому спускались в Черное море, обходя Днепровские пороги также волоком. Такие же примитивные способы обхода препятствий на естественных водных путях употреблялись у нас и в более позднее время. Так, например, в до-петровскую Русь, т. е. до XVIII-го столетия, транзитные перевозки грузов с Волги к Балтийскому морю производились следующим образом. Водный путь от р. Волги начинался у гор. Твери и шел вверх по р. Тверце до водораздела между Тверцою и Цною, потом суда спускались по р. Цне, озеру Мстино, реке Мсте в Ильменское озеро и далее по р. Волхову, Ладожскому озеру и р. Неве выходили в Финский залив. Через водораздел между рр. Тверцою и Цною, протяжением около 10 верст, грузы перевозились сухопутьем и это место называлось Вышним волоком (откуда получил название нынешний гор. Вышний-Волочек). Кроме того, при спуске по р. Мсте грузы вновь снимались с судов для обхода Боровицких порогов и шли сухопутьем свыше 90 верст по так называвшемуся Нижнему волоку. Лишь при Петре I-м и под его руководством были устроены на Вышневолоцком перевале каналы, шлюзы и водохранилища для образования непрерывного водного пути.

В других странах, куда цивилизация проникла в более ранние эпохи, к искусственному улучшению судоходных условий на реках прибегали гораздо ранее, чем у нас. Но вообще заботы о реках, как

о путях сообщения, открытых для общего пользования, не могли выливаться в сколько-нибудь реальную форму, пока государственная и общественная жизнь страны не достигала известной степени развития.

Напротив, для иных целей, земледельческих и промышленных, искусственные сооружения на реках возводились уже в самой глубокой древности. Известно, например, что древнейшие обитатели востока в Китае, Индии, Египте, Средней Азии и др. уже выполняли сложные гидротехнические работы для орошения земель, для чего или устраивали особые водохранилища или делали искусственный подпор речной воды, заграждая реку плотиной. Водоподпорные плотины на небольших реках делались также для образования запасов питьевой воды, для рыболовства, для пользования гидравлической силой воды и т. п. Последствием устройства таких плотин являлись увеличение естественной глубины на некотором протяжении реки вверх по течению и затопление преград в виде каменистых засорений, песчаных отмелей и т. п., и, таким образом, река на некотором протяжении обращалась из несудоходной в судоходную.

Вполне естественно, поэтому, что в позднейшее время, когда удобство водных путей сообщения стало приобретать все большее и большее значение и когда возникла потребность прибегать к искусственному улучшению судоходных условий рек, то воспользовались упомянутым действием плотин, и постепенно, путем усовершенствования речных водоподпорных плотин, выработался особый метод искусственного приведения не судоходных рек в судоходное состояние. Для перевода судна или плота из одного участка реки в соседний, делались вначале примитивные устройства в виде отверстия в плотине, закрываемого самыми простыми затворами, например, закладывалось отверстие брусьями, или устраивались ворота с большими отверстиями, закрываемыми щитами, дабы снявши щиты облегчить движение ворот, находящихся под давлением подпертой воды, и т. п. Однако, пользование такими устройствами сопряжено с большими неудобствами и возможно лишь для небольших судов и при малой высоте подпора. Затруднения эти были устранены изобретением так называемого камерного шлюза. В половине XV-го века в Италии, инженером Филиппом-дэ-Моденом, был построен первый камерный шлюз для проводки судов, доставлявших мрамор при постройке Миланского собора, из „Большого канала“ (Naviglio Grandé) в городской канал, при разности горизонтов воды в каналах до 3-х метров.

Изобретение камерного шлюза составило одну из важнейших эпох развития и улучшения водных путей, так как шлюз позволяет легко и спокойно переводить судно по водному пути из одного его участка в другой, если уровень воды в них не находится на одной высоте. Шлюз дал поэтому возможность судам двигаться по реке, разделенной водоподпорными плотинами, не только вниз по ее течению, но и вверх,

что раньше было очень трудно достижимо, а при значительных подпорах воды и размерах судов даже невозможно. Шлюз дал также возможность устраивать искусственно вырытые каналы по крутым склонам водоразделов и, таким образом, соединять для судоходства одну реку с другою.

Следующей, также важной, эпохой в развитии и улучшении внутренних водных путей явилось изобретение в тридцатых годах XIX-го столетия, французским инженером Поаре, металлической разборчатой плотины ¹⁾. Этим изобретением открывалась возможность применять для целей судоходства заграждение плотинами рек, на которых положение горизонта воды и количество протекающей воды меняются в широких пределах, так как такие плотины облегчают регулирование пропуска воды через плотину, а в нужных случаях плотина может быть быстро разобрана по всей ее длине, и, таким образом, река как бы возвращается в свое естественное состояние, что, например, необходимо при ледоходе, при половодье, а также при таком состоянии реки, когда она и без водоподпорных плотин дает по всему протяжению достаточные для судоходства глубины.



Черт. 1.

грессировала техника улучшения судоходных условий на реках без такого коренного изменения естественного режима их течения, как при канализации реки. Применяющиеся для сего технические меры направлены только к регулированию естественного быта реки с целью обеспечить судоходству удобный и устойчивый формат, который река могла бы

Так, исторически, создались два важнейшие типа искусственных водных путей: канализованные (шлюзованные) реки и искусственные соединительные каналы. Нижеследующая схема (черт. 1 и 2) поясняет их устройство.

На ряду с развитием и усовершенствованием искусственных водных путей про-



Черт. 2.

¹⁾ Первая плотина системы Поаре была построена во Франции на реке Йон, близ города Базевиль, в 1834 году.

поддерживать силою своего течения и, в нужных случаях, при помощи механического землечерпания. Это достигается так называемыми выправительными работами, которые состоят в устройстве постоянных сооружений (укрепление берегов, возведение дамб, запруды рукавов и т. п.) и в производстве землечерпания механическими снарядами.

В разных государствах, соответственно топографических и гидрографических условий местности и в зависимости от развития промышленности и торговли, от значения водных перевозок на ряду с железнодорожным движением, а также по многим другим причинам, — устройство искусственных водных путей шло с большей или меньшей интенсивностью.

К началу нынешнего столетия соотношение между протяжением естественных и искусственных водных путей характеризуется для некоторых европейских государств следующими цифрами.

ГОСУДАРСТВА.	Внутренние водные пути.				
	Естественные.		Искусственные.	Общее протяжение водных путей.	Процентное отношение искусств. водных путей к общему протяжению водных путей.
	Славянские ¹⁾ реки.	Судоходные реки.	Канализованные реки и каналы.		
	К и л о м е т р о в.				
Европейская Россия	135.218	42.402	1.969	179.589	1,1%
Германия	9.293		4.943	14.236	34,7
Франция	493	3.860	7.717	12.070	63,9
Австро-Венгрия	5.690	5.593	425	11.708	3,6
Италия	2.589	1.774	1.126	5.489	20,6
Голландия	763		3.300	4.063	81,2
Бельгия	682		1.514	2.196	69,0

¹⁾ Славянскими называются такие реки, которые пригодны для сплава плотов или не связанных между собой бревен, дров и т. п. материалов, но не для движения судов.

Часть I-ая.

Речи со свободным течением.

ГЛАВА I.

Свойства рек в естественном состоянии.

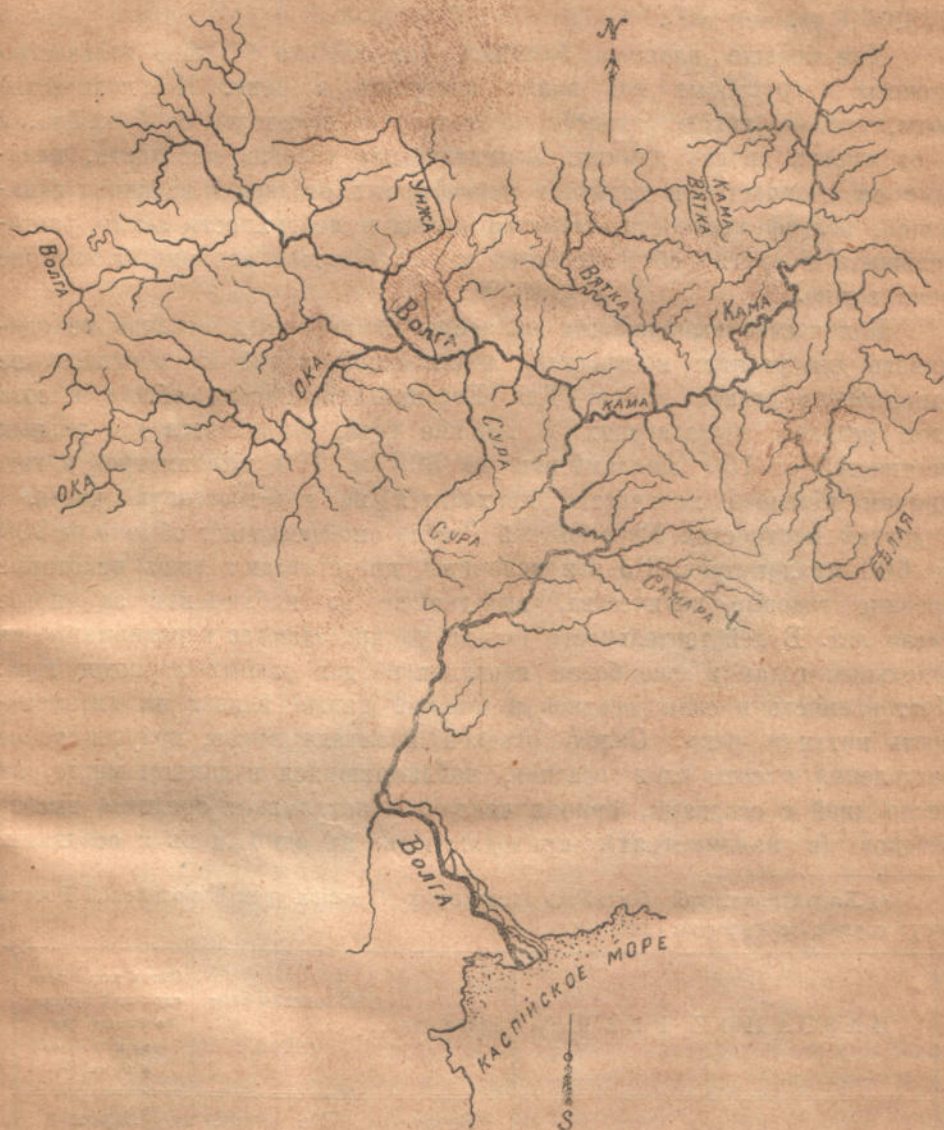
§ 1. Питание рек.

Атмосферная влага, выпадающая на землю в виде дождя и снега, частью испаряется обратно в атмосферу, частью впитывается в землю и, отдавши некоторую долю на питание растений, просачивается дальше в почву; остальное количество воды стекает по поверхности земли к более пониженным местам.

Вода, проникая в землю, движется в зависимости от свойств почвы в направлениях наименьших сопротивлений и, найдя выход на поверхность земли, образует ключи. Если количество воды, даваемое ключами, значительно, то из них образуются ручьи, которые текут по линии наиболее пониженных точек тальвегов и, соединяясь вместе и обогащаясь водою, постепенно образуют сначала незначительные, а затем и большие артерии постоянного течения воды на земной поверхности. В таком своем развитии они образуют реку, с системой ее притоков, несущую воду в море. Равным образом и та часть воды, которая остается на поверхности земли, стремится по направлениям наибольших уклонов к тем же пониженным местам и обогащает притоки и реку новыми количествами воды.

Вся местность, с которой атмосферные воды могут естественно стекать в данную реку по склонам долин как самой реки, так и ее притоков и всех разветвлений последних, называется *бассейном реки*. Возвышенности, разделяющие бассейны рек, называются *водоразделами*. Каждый приток реки а также и прочие реки, текущие в пределах бассейна главной реки и входящие в систему разветвлений ее притоков, имеют свои бассейны, общая совокупность которых и составляет площадь всего бассейна главной реки. Большие реки, протекающие на значительном протяжении и принимающие в себя, в качестве притоков, крупные реки, обладают весьма обширными площадями бассейнов, причем для таких рек общее протяжение всех главных и второстепенных притоков и их разветвлений выражается в очень большой

длине. Так, например, бассейн реки Волги (черт. 3), протяжение которой составляет около 3.380 верст, занимает площадь до 1.282.000 квадратных верст, причем общая длина рек, озер и каналов этого бассейна составляет свыше 74.000 верст.



Черт. 3.—Бассейн р. Волги.

Некоторые реки берут свое начало из более или менее обширных озер, питающихся другими реками, впадающими в озеро и принадлежащими к одному бассейну. В таком случае река, изливающая воды озера в море, при относительно коротком протяжении может обладать

также очень большою площадью питающего ее бассейна. Например, река Нева (черт. 4), вытекающая из Ладожского озера, имеет длину от истока до впадения в Балтийское море всего лишь около 70 верст, между тем бассейн, питающий эту реку, занимает площадь до 248.000 кв. верст ¹⁾).

Чем больше площадь бассейна, тем вообще большее количество сточных и грунтовых вод может поступать в реку. Но количество воды, несомое рекою, зависит не только от величины ее бассейна, а и от многих других причин. Климатические условия местности, влияющие на количество и характер атмосферных осадков и величину испарений, рельеф местности, свойства почвы и поверхности земли, растительность и другие обстоятельства имеют большое влияние на питание реки водою.

Количество выпадающих на землю атмосферных осадков не одинаково для разных местностей, а для одной и той же местности не одинаково в разное время. Для Европейской России общая высота слоя осадков, выпадающих в течение года, выражается для разных местностей от 150 миллиметров до 600 и 700 миллиметров в год, причем меньшее количество приходится на юго-восточную часть, а в других местностях Европейской России оно составляет обычно от 300 до 600 миллиметров. Но эти величины представляют лишь некоторые средние годовые количества, выведенные из наблюдений за многое число лет. В действительности осадки распределяются неравномерно по отдельным годам и еще более неодинаково для разных периодов года. Повторяемость и сила осадков и ливней также влияет на интенсивность питания реки. Силою осадков называют число, полученное от деления высоты слоя осадков, наблюдавшихся в данном месте, на число дней с осадками, причем число это показывает среднюю высоту осадков (в миллиметрах), приходящуюся на один день с осадками.

¹⁾ Характеристикой бассейнов некоторых больших рек Европейской России могут служить следующие данные.

НАЗВАНИЕ РЕКИ.	Длина реки.	Площадь бассейна.	Общая длина всех служащих путями сообщения рек, озер и каналов в бассейне.
	Верст.	Кв. верст.	Верст.
Волга	3.380	1.282.000	74.100
Днепр	2.020	456.000	24.900
Дон	1.980	378.000	8.600
Северная Двина	670	319.000	25.000
Нева	70	248.000	19.000
Западная Двина	540	74.000	9.500

Силою ливня называют или абсолютную высоту слоя воды, выпавшей во время ливня, или высоту слоя, приведенную к единице времени, (например, 1 часу, $\frac{1}{2}$ часа и т. п.). Чем большая повторяемость осадков, то-есть чем меньшие промежутки времени между выпадением осадков, тем на более насыщенную водою землю они падают, а потому



Черт. 4.—Бассейн р. Невы.

тем меньшая их часть впитывается почвою и растениями и тем большее количество воды остается свободным для непосредственного стока по склонам бассейна реки. Подобное же влияние имеет и сила осадков. Вид самих осадков тоже имеет значение для питания реки. В зимнее время, когда осадки выпадают в виде снега, притом на мерзлую почву, они не могут, до наступления весны, давать реке сколько-нибудь значительных количеств воды. Для многих рек в морозные зимы, несмотря на большие атмосферные осадки (снег), наступает период самого слабого питания; напротив, весной, когда тает весь за зиму скопившийся снег, сток воды в реку происходит большими массами

в короткое, сравнительно, время. Однако, таяние снега происходит неодинаково в разные весны. Бывает, что глубокий снежный покров не дает весной больших количеств воды; если, например, таяние снега сменяется частыми заморозками и, особенно, если благоприятны условия для сильных испарений, то снег исчезает постепенно, не образуя сильных потоков и мало насыщая почву водой. Напротив, при дружном таянии снега, особенно, если оно совпадает с сильными и теплыми дождями, получают большие массы воды, быстро стекающие по поверхности земли.

Потери воды на испарения также неравномерно отражаются на интенсивности питания реки. Чем больше испаряемость вод, поступивших из атмосферных осадков на площадь бассейна реки, тем меньшую часть получает последняя. Но так же, как осадки, испаряемость неодинакова для разных местностей, а для одной и той же местности в разное время и при неодинаковых условиях. Количество и быстрота испарения зависит от многих обстоятельств: от температуры воздуха, степени влажности воздушных течений, от силы ветров и от др. причин ¹⁾. Условия, способствующие усилению испарений, могут наступать в периоды меньших атмосферных осадков, в других же местностях они могут совпадать с временем наибольших осадков.

Растительность тоже имеет большое влияние на испаряемость атмосферных осадков, на удержание их в почве и на скорость стока воды по поверхности земли. Растительность впитывает влагу, необходимую для самих растений. Листья деревьев в лесах могут во время дождя удерживать на себе много влаги в виде капель и представляет большую поверхность для испарения этой влаги, но вместе с тем растительный покров уменьшает интенсивность испарения воды, скопившейся под этим покровом в почве земли и на ее поверхности ²⁾. Таяние снега в лесу происходит медленнее, чем на открытых местностях. Корни растений и трава затрудняют сток воды по поверхности. В общем наблюдается, что леса и вообще растительность способствуют более равномерному питанию рек от выпадающих в их бассейнах атмосферных осадков.

Не меньшее значение имеет рельеф местности в пределах бассейна реки. По крутым склонам гор и холмов сток воды происходит быстрее, чем в равнинных местностях. После дождей и при таянии снега массы воды, остающейся на поверхности земли, стекают в более

¹⁾ Средняя высота слоя испарения со свободной поверхности воды составляет для южных губерний Европейской России от 500 до 800 миллиметров в год, а в некоторых местностях средне-азиатских частей России достигает 1.500, 2.000 и даже 2.700 миллиметров в год.

²⁾ Некоторые наблюдения показывали, например, что испарение воды из почвы может быть на 85% меньше в лесу, чем на открытом месте, а свободная водная поверхность испаряет в лесу на 64% меньше, чем на открытом месте.

короткий срок в реки; это же обстоятельство влияет на меньшую потерю воды на испарение и на просачивание в землю. Другое влияние оказывают встречающиеся на возвышенностях котловины: в них скопляется вода, которая потом постепенно частью испаряется, частью просачивается в грунт и там движется в сторону наименьших сопротивлений, иногда в сторону бассейна другой реки. Не редко бывает, что соседние речные бассейны, резко разграниченные на поверхности земли, имеют соединения в отношении подземных вод, причем последние, в зависимости от относительной высоты напора, могут двигаться в сторону того или другого бассейна, обогащая водою один из них за счет другого.

Питание реки грунтовыми водами, хотя и в меньшей степени, тоже меняется по своей интенсивности, причем большое значение в этом отношении имеют свойства почвы и колебания уровня воды в реке. При подъемах уровня воды в реке, особенно при разливах, значительная часть речной воды вновь теряется рекою на просачивание в почву; после падения высоких уровней реки, часть этой воды поступает из почвы обратно на питание реки и чем быстрее сменяется в реке высокий уровень воды на низкий, тем интенсивнее происходит в этот период времени питание реки грунтовыми водами.

Разнообразие приведенных обстоятельств, влияющих на питание реки, ставит большие трудности для установления сколько-нибудь точной и постоянной, а тем более прямой зависимости между количеством воды, протекающей в данное время и в данном месте реки, и количеством выпавших атмосферных осадков в той части бассейна, которая питает реку до этого ее места. Определение упомянутой зависимости тем более трудно, что воды, поступающие из разных мест бассейна, должны, ранее достижения определенного пункта реки, протекать по реке и системе ее притоков путь не одинаковой длины и с неодинаковой скоростью течения, а, следовательно, они доходят до этого пункта реки по истечении не одинакового времени.

Мерилом питания реки для данного ее пункта служит, вообще, отношение количества воды, протекающей в этом пункте в течение определенного времени, к количеству атмосферных осадков, выпавших в соответствующее время в бассейне всей вышележащей части реки. Отношение это называется *коэффициентом стока* или *гидрологическим коэффициентом*. Величина гидрологического коэффициента исчисляется на основании результатов наблюдений за осадками на метеорологических станциях и по измерениям количества воды, протекающей в данном месте реки, так называемого *расхода* воды, о котором изложено далее, в § 6-м. Но, как сказано выше, величину этого коэффициента нельзя установить, со сколько-нибудь вероятною правильностью, для отдельных коротких периодов времени. Чем за более долгое время взяты результаты наблюдений для исчисления коэффициента стока

как некоторой средней величины этого коэффициента, тем меньшее значение приобретают частные обстоятельства, влиявшие на питание реки. Поэтому, при исчислении средней величины коэффициента стока на основании результатов наблюдений за многие годы величина эта приобретает значение, более правильно характеризующее условия питания реки.

Коэффициент стока неодинаков, конечно, для разных рек и для разных мест одной реки, а также неодинаков и для разных периодов года. Он, например, меньше для сухого летнего времени, сравнительно с весенним временем, или, как это бывает в более теплых странах Западной Европы, сравнительно с зимним временем. Средняя величина этого коэффициента в большинстве случаев находится в пределах от 0,20 до 0,50; но для некоторых рек величина коэффициента стока может понижаться и повышаться далеко за упомянутые пределы¹⁾.

Отмеченные обстоятельства, которые могут влиять на питание реки, указывают, что количество воды, негемое рекою, бывает не одинаково не только в разных местах реки, но и в одном и том же месте в разное время. Более постоянным и равномерным источником для питания реки служат грунтовые воды, а также воды озер и болот, расположенных в бассейне реки; в бездождное время они и составляют те запасы, благодаря которым не прекращается течение воды в реке. Менее равномерно питание рек той частью атмосферных осадков, которая поступает в реку непосредственным стоком по поверхности земли, причем в некоторые периоды года, или при известных обстоятельствах прибыль таких вод в реку может быть весьма велика.

Состояние реки, когда она питается, главным образом, грунтовыми водами и запасами воды в болотах и озерах, а также небольшим количеством атмосферных осадков от обыкновенных дождей, называется *меженным состоянием* (меженью). Для наших рек меженнее состояние наступает, обыкновенно, в летнее время после прохода весенних вод. Если количество текущей в реке воды значительно увеличивается на некоторое время вследствие каких-либо случайных или периодически повторяющихся причин (например, вследствие сильных дождей, особенно если река протекает в гористой или холмистой местности, вследствие

¹⁾ Для реки Днепра у гор. Клева, по исследованиям Опокова, средняя величина коэффициента стока за период времени 1877—1903 гг. исчисляется в 0,243, причем для отдельных годов она колеблется в пределах от 0,129 до 0,412. Для рек Германии коэффициент стока составляет, по Мелендорфу, в среднем 0,474, колеблясь для разных рек от 0,281 до 0,716. Разные исследователи определяли средний годовой коэффициент стока: для р. Сены у Парижа от 0,280 до 0,333; для р. Дуная у Вены—0,56; для английских рек—0,398. Примером, как низко может падать величина коэффициента стока, может служить р. Нил у Каира, где, по Вилькоксу, коэффициент стока составляет только 0,033, так как громадное количество воды, получаемой в верховьях реки испаряется на дальнейшем ее протяжении при прохождении через знойные пустыни.

таяния снегов и льдов в горах и т. п.), то такое состояние реки называется *паводком*. Состояние реки, когда она несет наибольшее в году количество воды (у нас обыкновенно весной после таяния снега) называется *половодьем*.

§ 2. Изменения высоты уровня воды в реке.

В зависимости от меняющегося количества воды уровень воды в реке не остается на постоянной высоте. При меженнем состоянии реки и вообще в периоды более слабого питания уровень воды понижается, во время же прибыли воды, например, при обильных атмосферных осадках, или весной при таянии снега, уровень значительно повышается, причем если река ограничена низкими берегами, вода выходит из берегов и затопляет низменные местности, образуя так называемые разливы. Пределы, в которых происходят изменения уровня воды в данном месте реки, т. е. самый низкий горизонт (условно обозначаемый С. Н. Г.) и самый высокий горизонт (С. В. Г.), определяются по данным наблюдений за многие годы. Если же организация правильных, постоянных и точных наблюдений за состоянием уровня воды относится к сравнительно небольшому числу лет, то приходится пользоваться указаниями старожилов. Нужно, однако, иметь в виду, что наблюденные низшие и высшие положения горизонта воды в данном месте реки не дают вполне точных пределов возможных изменений уровня, так как может случиться, что уровень воды понизится или повысится и за пределы наблюдавшихся в прежние годы положений его. Но, чем продолжительнее период правильно организованных наблюдений за колебаниями уровня воды, тем большей вероятностью обладают установленные на основании таких наблюдений крайние пределы возможных изменений высоты уровня. Нужно также иметь в виду, что при некоторых явлениях, например, при образовании в реке ледяных зажоров, уровень воды может выходить далеко за пределы его колебаний, бывающих при свободном состоянии реки. Ледяной зажор, забивая реку льдом до самого дна и тем преграждая свободное течение, может служить причиной чрезвычайно низкого падения уровня воды в местностях ниже образовавшегося зажора и высоко поднимать уровень воды на вышележащем участке реки.

Общая высота изменений уровня воды, то есть разность высот самого высокого и самого низкого, из наблюденных в течении долгого периода времени, положений уровня воды в данном месте реки, или, как иногда называют, полная амплитуда возможных колебаний уровня воды, бывает не одинакова для разных рек, а для каждой реки на разных ее участках¹⁾. Также и в каждом месте реки бывает не

¹⁾ На р. Волге разность между высоким и низким уровнями воды достигает: около Твери до 5,10 саж., Рыбинска—5,7 саж., Нижнего Новгорода—6,0 саж., Сим-

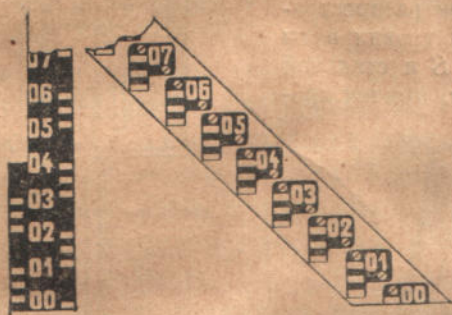
одинакова в разные годы разность высот самого высокого и самого низкого положения уровня воды в течение года (годовая амплитуда колебаний уровня воды). Как общая высота колебаний, так и скорость подъема или понижения уровня зависят от разнообразных условий речного питания и от свойств самой реки: от величины бассейна, рельефа местности, свойства почвы, климатических условий местности, от величины, количества и взаимных расстояний притоков, от многоводности самой реки, от ее продольного профиля и от многих других обстоятельств. Обыкновенно в части реки, ближайшей к устью, высота изменений уровня воды значительно уменьшается; так, например, на р. Волге полная высота изменений уровня воды, достигающая в верхней и средней частях реки до 6-ти и более саж., уменьшается около Астрахани до 1,9 и менее саж. Значительно влияют на уменьшение колебаний уровня воды в реке большие озера, если река образует их, или вытекает из них, а на дальнейшем своем протяжении не принимает крупных и многочисленных притоков. В этих случаях озеро, вследствие его обширной площади, служит как бы аккумулятором воды при большом ее притоке и распределяет вытекание воды в реку на более продолжительное время. В таких условиях, находятся, например, реки бассейна р. Невы (Волхов, Свирь и самая р. Нева), благодаря обширным озерам—Онежскому, Ильменю и Ладожскому.

Изучение свойств реки в отношении изменений положения уровня воды на разных ее участках и при разных обстоятельствах имеет вообще весьма важное значение. В основании этого изучения должны быть положены, во 1-х, постоянные измерения высоты уровня воды во многих пунктах по длине реки, для чего в этих пунктах учреждаются так называемые *водомерные посты* и *гидрометрические станции*, оборудованные необходимыми для сего приборами, а, во 2-х, правильно организованные наблюдения за атмосферными осадками и другими метеорологическими явлениями на метеорологических станциях, учрежденных в достаточном числе пунктов в пределах бассейна реки.

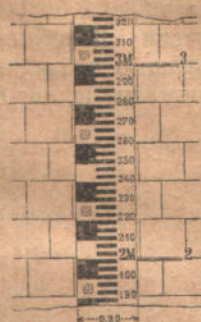
Более простыми приспособлениями для измерения высоты уровня воды служат закрепленные или съемные *водомерные рейки*, разделенные на деления, соответственно принятой точности измерений. На русских реках водомерные рейки разделены, обыкновенно, на сотые доли сажени; на немецких и французских реках деления делают в метрических мерах, обыкновенно по 2 сантиметра каждое деление. Измерения должны производиться в таких местах, где уровень воды соответствовал бы действительному положению уровня воды в реке. Поэтому не

бурска—6,7 саж., Астрахани—1,9 саж.; на р. Днепре около Киева до 3,2 саж., Екатеринослава—3,2 саж., Херсона—1,4 саж.; на р. Доне около Калача до 2,3 саж.; на р. Запавной Двине: около Витебска до 3,4 саж., Двинска 3,3 саж., Риги—2 саж.; на р. Висле около Варшавы до 3,1 саж.

следует устраивать водомерные посты в местах, удаленных от реки, например в гаванях, далеко входящих в берег, или около сооружений, вызывающих местный более или менее значительный подпор текущей воды. Но вместе с тем необходимо выбирать для устройства водомерного поста такие места, которые были бы защищены от ледохода и всегда доступны для удобного наблюдения по рейке.

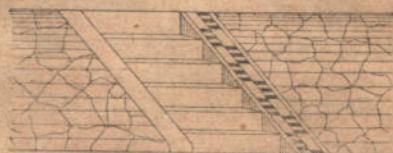


Черт. 6.

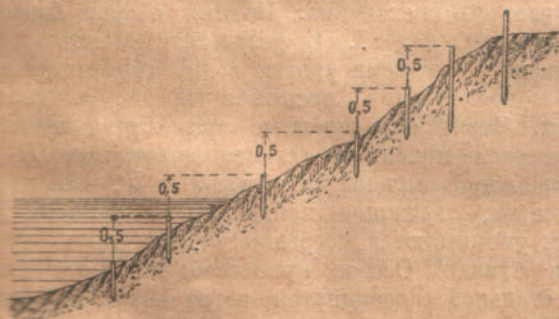


Черт. 5.

Если имеются вертикальные прочные стенки, например, набережные, устой мостов и т. п., то водомерные рейки прикрепляются к такой стенке в вертикальном, или в наклонном положении (черт. 5 и 6). Если вертикальной стенки не имеется, а имеется прочно укрепленный откос, то водомерную рейку можно расположить наклонно, например, как показано на черт. 7, причем деления рейки должны быть сделаны в измененном масштабе, соответственно уклону откоса. При весьма значительных высотах



Черт. 7.



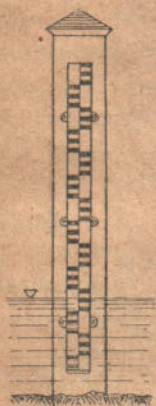
Черт. 8.

всякий раз устанавливая рейку на свай, специально для этого забитые по откосу берега, как показано на черт. 8; положение верха этих свай должно быть точно определено нивелировкой по отношению к постоянному реперу, а для удобства наблюдений, верхи свай расположены на равных, по высоте,

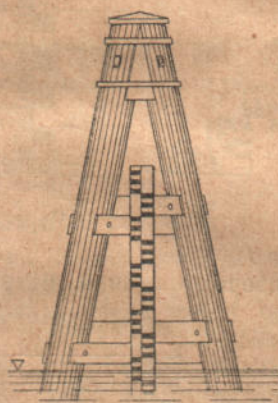
изменения уровня воды в реке, иногда закрепляют несколько реек на разных высотах; деления всех этих реек должны быть точно отнесены к положению нуля, при чем наблюдения производятся по той или другой рейке, в зависимости от состояния уровня воды в реке. Если подходящих сооружений в данном месте реки нет, то наблюдения производятся при помощи переносной рейки, а именно

расстояниях, например, через 0,5 сажени. Для водомерных постов, учреждаемых на короткое время, иногда прикрепляют водомерные рейки к сваям, или к свайным палам, как показано на черт. 9 и 10.

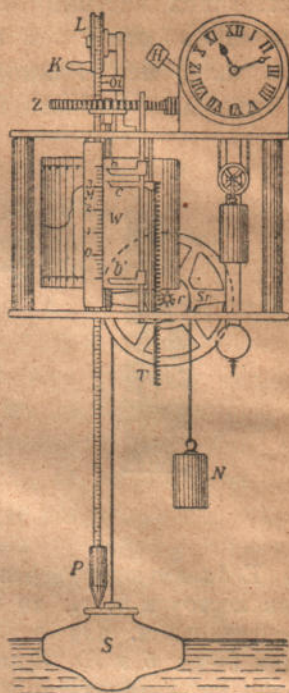
Для более точных измерений и для автоматического непрерывного записывания положения уровня воды применяются особые приборы, лимниграфы, различных систем. На черт. 11 показан один из таких приборов, получивший большое распространение в Пруссии. Колебания уровня воды сообщают, помощью поплавка *S* и стальной проволоки, движение шкиву *Sr*, причем про-



Черт. 9.



Черт. 10.



Черт. 11.

волока находится всегда в натянутом положении помощью гири *N*. Вращение шкива *Sr* вызывает, через шестерню *r*, вертикальные перемещения кремальеры *T*, к которой прикреплен штифт *c* с карандашом. Штифт этот рисует линию на бумаге, наверху на барабан *W*, который медленно и равномерно вращается помощью часового механизма. Полный оборот барабан делает обыкновенно в течение одной недели. В результате действия такого прибора получается график положения уровня воды, горизонтальная ось которого изображает в определенном масштабе время, а вертикальная—высоту уровня воды. Через определенные промежутки времени (обыкновенно через 4 часа) часовой механизм ударяет молоточком *H* по вертикальной штанге, к которой прикреплены штифты *b* и *b'*, делающие вверху и внизу графика отметки, служащие контрольными метками для горизонтального масштаба, чем уменьшаются погрешности, могущие происходить от влажного состояния бумаги. Особое приспособление, состоящее из масштабной линейки *M* и стальной перекинутой через шкив *L* мерной ленты с гирей *P*, могущей быть опущенной до поплавка *S*,—дает возможность измерять непосредственно высоту уровня воды от положения, принятого за нуль.

Измерения высоты уровня воды в реке производятся от некоторой постоянной отметки, принятой за нуль. Положение нуля каждого водомерного поста, закрепленное нивелировкой от постоянного репера,

устанавливается при учреждении поста, а нули всех водомерных постов связываются общей нивелировкой. Обыкновенно, нуль водомерного поста соответствует одному из низких положений уровня воды в реке, но, по самой условности установления нулей водомерных постов, их взаимное положение не выражает какого-либо мгновенного положения уровня воды по всей длине реки. Они и не могут выражать такого положения уровня речной воды, так как колебания уровня воды происходят в разных местах реки не одновременно и неравномерно.

Измерения высоты уровня воды должны производиться на всех постах ежедневно и одновременно, по несколько раз в день в определенные часы. Для сопоставления данных о состоянии уровня воды в реке с данными метеорологических наблюдений в пределах бассейна реки, необходимо, чтобы те и другие наблюдения, насколько это возможно, производились в одни и те же часы. Ночных и более частых наблюдений следует избегать, как утомляющих и затрудняющих наблюдателей, а потому становящихся менее достоверными¹⁾. Но в некоторых случаях, особенно при больших и быстрых прибывах и убывах воды, бывает необходимо делать наблюдения более часто, иногда через каждый час. Там же, где частые изменения высоты воды имеют особо важное значение, следует пользоваться лимниграфами.

Результаты наблюдений на данном водомерном посту заносятся в особые ежедневные, или за некоторый период времени (например, месячные) ведомости и засим, для удобства пользования, изображаются графически, подобно тому, как показано на чертеже 13-м. Горизонтальная ось графика, общая длина которой принимается за годовой период времени, принимается за время и деления ее соответствуют времени производства наблюдений высоты уровня воды (месяцы, и дни); в каждом делении откладываются по вертикали, в принятом масштабе, измеренные высоты уровня по отношению к горизонту, принятому за нуль и изображаемому на графике горизонтальной прямой линией. Линия, соединяющая вершины отложенных высот уровня, выражает последовательные изменения уровня воды в данном месте реки в течение всего данного года. Если на одном графике нанести кривые годовых колебаний высоты уровня за несколько лет, то такой график даст уже некоторое наглядное представление о режиме реки, в данном ее месте, по отношению колебаний уровня воды.

¹⁾ В России однообразная система наблюдений на речных водомерных постах была установлена с 1876 года. Наблюдения производятся: на постах I-го разряда круглый год по три раза в день, на постах II-го разряда, — от начала весеннего ледохода до окончательного замерзания, — по одному разу в день. Время наблюдений: на постах первого разряда в 7 ч. утра, в 1 ч. пополудни и в 9 ч. вечера, на постах второго разряда — в 7 час. утра; с 1-го октября по 1 апреля утреннее наблюдение производится не в 7 час. утра, а в 8 час. утра.

Низкие и высокие положения уровня воды имеют особые значения. Первые преимущественно для судоходства, вторые — для расположенных около реки городов, селений и вообще для прибрежных местностей (для земледелия и сельского хозяйства, лесоводства и проч.). Наименьшие на судоходных фарватерах глубины, бывающие при низких водах, влияют на использование реки, как пути сообщения; размывы берегов, затопления низменных местностей и другие явления при высокой воде могут оказывать в некоторых случаях благотворные (например, орошение лугов), в других случаях вредные и опасные явления (наводнения, заболачивание местности и т. п.). Низкие положения уровня воды, соответствующие меженному состоянию реки, принято на наших реках называть вообще *меженными* горизонтами.

Горизонты воды, как меженный, так и половодья, не представляют собою, каждый, какой-либо постоянной высоты уровня воды в реке. Между тем при проектировании и исполнении речных сооружений и работ, служащих или для судоходных целей, или для разных потребностей в прибрежных местностях, бывает необходимо знать некоторые определенные положения высоты уровня воды в данном месте реки, имеющие то или иное значение для преследуемой цели, или характеризующие общие свойства и режим реки. Как уже сказано выше, на основании многолетних наблюдений на водомерных постах, или пользуясь иными достоверными сведениями, устанавливают понятия о самом высоком и самом низком уровнях воды, т. е. о крайних когда-либо наблюдаемых пределах высокого и низкого стояния воды в данном месте реки. Если наблюдения на водомерном посту производились ежедневно и регулярно в течение долгого времени, например, несколько десятков лет, то на основании этих данных можно установить понятие о возможных в данном месте реки самом высоком и самом низком положениях уровня для каждого месяца в году, или для иной большей или меньшей части годового периода. Важно также знать самый высокий и самый низкий уровень воды при вскрытии реки от льда, при замерзании ее и при ледоходе, высоту уровня, превзойдя которую река выходит из берегов, образуя разливы, самый высокий уровень летних паводков и т. п.

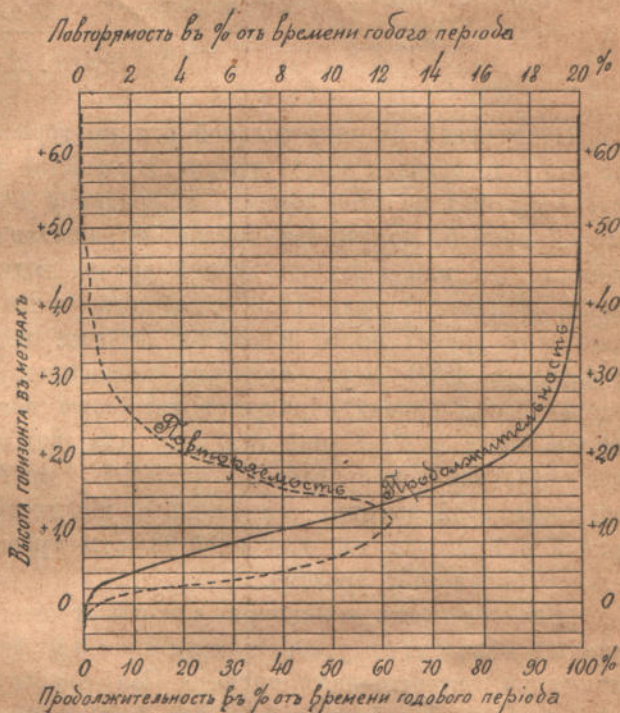
Но, кроме определения вышеупомянутых положений уровня воды, имеющих значение наблюдаемых фактов, полезно установить понятие и о некоторых уровнях, носящих по способу их определения условный характер, но имеющих значение для характеристики свойств реки, а во многих случаях и практическое значение для судоходства и для гидротехнических сооружений и работ. Вычисливши для каждого дня в году средне-арифметическую величину наблюдаемых в этот день за многие годы высот уровня воды и вычертивши график исчисленных величин, получают средние положения уровня для каждого дня в году и среднюю кривую годовых изменений уровня воды в реке.

Путем таких же вычислений устанавливаются понятия о среднем для какого либо года, или о среднем для многих лет положении уровня в каждом месяце, или в иной части годового периода. Большое значение имеет вычисленный средний для целого года уровень или средний вообще уровень воды в данном месте реки, вычисленный за долгий период времени. Высота такого среднего уровня есть средняя арифметическая величина из высот уровня, наблюдаемых за каждый день в течение года или в течение многих лет. Положение среднего уровня служит для многих исследований в отношении колебаний уровня воды; иногда считают его за тот уровень, урез которого на берегу граничит русло реки от берега.

Пользуясь исчислениями средних высот уровня, можно установить понятие о наиболее частых и продолжительных в течение годового периода уровнях воды в реке, имеющих важное значение для судоходства, для регулирования рек и, для проектирования некоторых сооружений и проч. Более наглядное представление имеет графический способ определения таких уровней.

На чертеже 12 представлен такой график для реки Вислы около гор. Варшавы, составленный

по данным ежедневных наблюдений за период времени 1831/96 гг. При составлении графика, за ординаты приняты высоты уровня воды, выраженные в делениях, которые соответствуют каждое 20 сантиметрам высоты по рейке водомерного поста. Общее число дней наблюдения за этот период времени (24.107 дней) распределено на количества дней, когда положение уровня воды находилось в пределах той или иной части высоты, и эти количества дней вычислены в процентном отношении к общему числу всех дней наблюдений. Например:

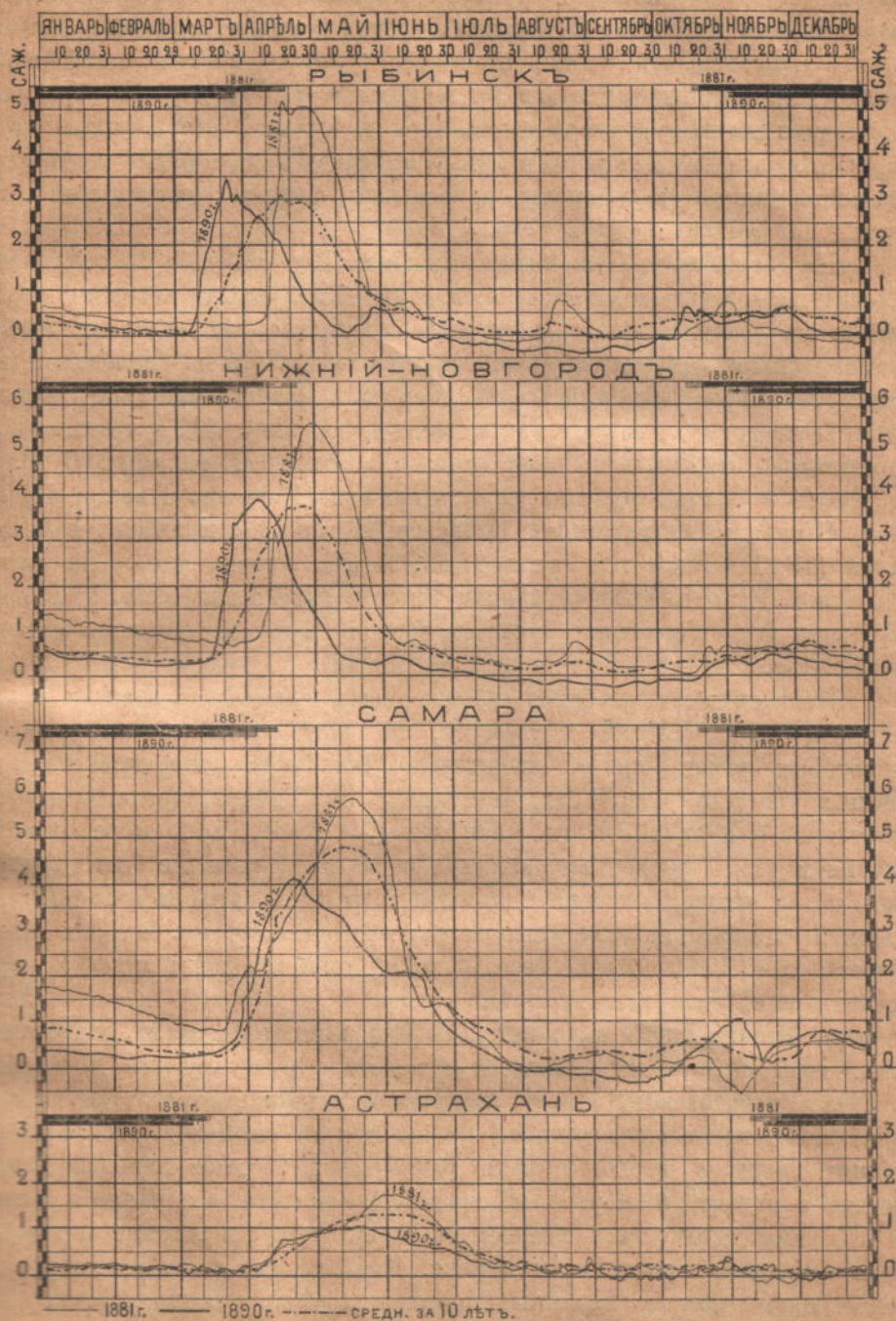


Черт. 12.

между 6,20 и 6,0	м.	уровень бывал в числе	1	дней или	0,0 ⁰ / ₀
" 6,00 "	5,80 "	" " "	4	" "	0,0 ⁰ / ₀
	и т. д.				
" 3,20 "	3,00 "	" " "	201	" "	0,8 ⁰ / ₀
" 3,00 "	2,80 "	" " "	255	" "	1,1 ⁰ / ₀
	и т. д.				
" 1,40 "	1,20 "	" " "	2.869	" "	11,8 ⁰ / ₀
" 1,20 "	1,00 "	" " "	2.965	" "	12,3 ⁰ / ₀
" 1,00 "	0,80 "	" " "	2.809	" "	11,7 ⁰ / ₀
	и т. д.				
" 0,00 "	0,20 "	" " "	66	" "	0,3 ⁰ / ₀
" 0,20 "	0,40 "	" " "	2	" "	0,0 ⁰ / ₀
Всего . 24.107					1000,0 ⁰ / ₀

Откладывая от вертикальной оси по горизонтальным прямым, против соответствующих высот уровня, количества (в ⁰/₀) дней, когда уровень воды был на этой высоте, и соединяя полученные точки непрерывной линией, получается кривая, выражающая относительную повторяемость тех или иных положений уровня воды; крайняя точка этой линии, соответствующая 12,3⁰/₀ общего числа дней, указывает, что чаще всех других было положение уровня воды в пределах высоты от 1,00 до 1,20 метр. от нуля водомерного поста. Другая линия (интегральная кривая) образуется также, но последовательным откладыванием числа (в ⁰/₀) дней так, что для каждой высоты отложено по горизонтальному направлению число ⁰/₀ дней, когда уровень воды был ниже этой высоты; чем большею пологостью обладают части этой кривой в пределах той или иной высоты уровня воды, тем продолжительнее бывал этот уровень.

Периодичность изменения высоты уровня воды в реке зависит, главным образом, от условий ее питания и от тех обстоятельств, которые влияют на интенсивность питания. На некоторых реках наблюдается периодичность колебания горизонта воды даже в течение каждых суток. Это происходит, например, на горных реках по причине таяния под солнечными лучами глетчеров и вечных снегов, вследствие чего днем, после полудня, бывает прибыль воды в верховьях таких рек. Иногда на небольших реках наблюдается суточная периодичность колебаний горизонта воды, происходящая от периодичности работы водяных мельниц, для которых река запружена плотинами. Для рек более значительных и судоходных приобретают особое значение колебания горизонта воды в годичный период времени. Такие колебания зависят, главным образом, от атмосферных осадков и от условий, влияющих на коэффициент стока. В местностях с теплым климатом, где или вовсе не бывает снега и льда, или где выпадающий снег не сохраняется



Черт. 13. — График колебаний уровня воды на р. Волге.

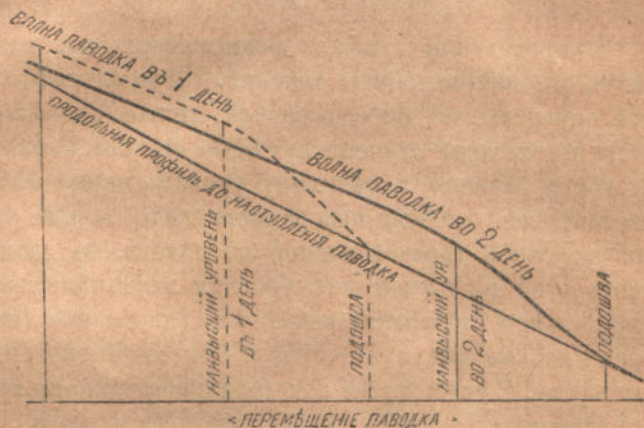
сколько-нибудь продолжительное время, колебания уровня воды находятся в более непосредственном отношении к времени и силе атмосферных осадков. Колебания уровня много зависят, однако, также и от годовых изменений температуры, от времени наибольшего испарения, поглощения влаги растениями и от других обстоятельств, влияющих на коэффициент стока. При холодных и умеренных климатах с продолжительным периодом зимы, особенно в равнинных местностях, весеннее таяние снега имеет наибольшее влияние на периодические изменения уровня воды в реке.

На большинстве значительных рек Европейской России низкие (меженные) уровни воды наступают с июня или июля месяца, продолжаясь на осеннее время и изредка прерываясь непродолжительными и невысокими подъемами уровня при паводках. Время половодья наступает с марта или апреля месяцев и в апреле или мае месяцах горизонты воды достигают наивысшего положения. На чертеже 13-м представлен график колебаний горизонта воды в 1881 и 1890 гг. на р. Волге в разных пунктах ее протяжения (Рыбный, Нижний-Новгород, Самара и Астрахань) и вычисленные по десятилетним наблюдениям (1881—1890 гг.) средние положения уровня воды. На реках Западной Европы высокие уровни бывают ранее; например, в низовьях западных рек Германии высокие уровни воды наступают в феврале (рр. Везер, Эмс) и даже в январе (Рейн).

Периодические колебания уровня воды, находясь в зависимости от климатических условий местностей, по которым протекает река, на некоторых реках иногда значительно отличаются, по времени, для разных участков реки. Так, например, на Рейне, период половодья наступает в верхней части реки летом, в июле, и по мере приближении к устью период высоких вод реки становится все более ранним, так что в нижней части реки высокие воды приходится на январь месяц. Объясняется это явление следующими обстоятельствами. В горах Швейцарии, где Рейн берет свое начало, прибыль воды зимою бывает наименьшая, так как местность зимою и до поздней весны покрыта снегом. Таяние снега начинается во второй половине весны, наибольший сток воды происходит в июне и июле, когда и подымается до высших пределов уровень воды в реке. В средней и нижней частях реки, с ее притоками, наибольшее питание происходит от зимних дождей; влияние летних паводков верховья реки ослабляется по мере приближения к устью, а потому и период половодья начинается все ранее и ранее.

Время половодья и межи характеризуют регулярные в течение года изменения уровня воды в реке. Но, как уже было упомянуто, на реках происходят и случайные повышения уровня воды (паводки) под влиянием факторов, менее постоянных по времени и силе их проявления. На многих реках паводки происходят в меженное время. Происходят они преимущественно от выпадения сильных дождей, особенно на

тех реках, которые протекают в гористых и холмистых местностях. Величина, скорость наступления и продолжительность таких паводков весьма непостоянны не только на разных реках и в разных местах одной реки, но и в каждом данном ее месте, так как сами условия образования паводка и его прохождения каждый раз могут быть весьма различны. На это влияют: сила и длительность дождей, относительное расположение и величина районов, где они выпадают, величина коэффициентов стока и проч. При прочих равных условиях, наибольший паводок в данном месте реки может наступить в том случае, если к этому месту подойдут одновременно наибольшие прибылые воды со всех вышележащих притоков реки; неравномерность же подхода к этому месту паводков притоков ослабляет совокупное их действие на величину паводка, что обыкновенно и происходит, так как на каждом притоке условия образования паводков, их сила и характер прохождения в свою очередь неодинаковы, как неодинакова и длина пути паводков на притоках до реки, в которую они впадают. Если к этому добавить, что выпадение дождя неодинаково в разных районах речного бассейна, что не одинаковы в них и условия стока атмосферных вод, то становится понятным крайнее разнообразие паводков в каждом данном месте реки.



Черт. 14.—Движение паводка.

Такой паводок можно сравнить с волною, или, точнее, полуволной, поднявшейся на некотором, обыкновенно значительном, протяжении реки (черт. 14). Начавшийся в данном месте реки подъем уровня воды увеличивается с большею или меньшею скоростью и равномерностью повышения и достигает в некоторый момент своего максимума; затем начинается падение высоты уровня, также с большею или меньшею скоростью и равномерностью, пока уровень воды не вернется к нормальному его положению. При этом гребень волны (точнее сказать перекат в продольном профиле поверхности воды) постепенно подвигается вниз по течению реки. Длина волны паводков тоже неодинакова; чем продолжительнее паводок, тем длина его волны большая. Линия очертания волны в продольной профили может быть плавною, но может

образоваться на ней и несколько гребней, неодинаковых между собою по высоте и по форме.

Тем не менее в условиях образования и прохождения паводков для каждой реки имеются некоторые характерные особенности, а иногда и некоторая регулярность явлений. Поэтому и в виду важного значения паводков как для судоходства, так и для тех или иных технических мер с целью улучшения реки, изучение характера паводков является необходимым. Эта задача весьма сложна, причем требует продолжительных наблюдений как гидрометрических, так и метеорологических. У нас в России сильные паводки бывают на реках, берущих начало в гористых местностях, каковы, например, Висла, Днестр, кавказские и некоторые другие реки.

§ 3. Падения и уклоны поверхности воды.

В продольном профиле реки поверхность воды постепенно понижается по направлению течения. Продольный профиль поверхности воды определяется нивелировкой, причем абсолютные отметки высот поверхности воды относят к одной, принятой за нуль, горизонтальной плоскости, именно к ординату уровня моря. Если при производстве нивелировок отметки поверхности воды в реке относят к какой-либо иной условной горизонтальной плоскости, то должна быть определена высота этой плоскости над уровнем моря. Нивелируя поверхность воды в продольном профиле реки, на каком-либо ее протяжении, нужно определить ее вид при одном и том же (мгновенном) состоянии уровня воды в реке. С упомянутой целью одновременно по всему этому протяжению реки отмечают на забитых кольях урез воды и засим нивелируют по этим заметкам. Нивелировку связывают с репером, высота которого относительно уровня моря известна. Если протяжение так велико, что затруднительно сделать одновременно и сохранить заметки уреза воды, то нивелировку производят разновременно по участкам, причем на водомерных постах замечают положение уровня воды в тот момент, когда делались для нивелировки отметки уреза воды на нивелировочных кольях. Пользуясь такими наблюдениями приводят результаты нивелировки по всем участкам к одному какому-либо положению уровня воды в реке, называемому *условным* уровнем. Само собою разумеется, что производя нивелировку разновременно, по участкам, следует избегать такого состояния реки, когда происходят быстрые и большие изменения ее уровня. Наиболее благоприятным, в этом отношении, временем для производства нивелировок является время, когда река находится в устойчивом меженном состоянии. Продольный профиль поверхности воды в реке следует определить по обоим берегам ее отдельно.

Разность отметок поверхности воды в начале и в конце данного участка реки при мгновенном состоянии уровня воды называется *общим падением* реки на этом участке и при этом ее уровне. Отношение величины падения к длине участка называется *средним относительным падением* или *средним уклоном* для данного участка реки и при данном состоянии ее уровня.

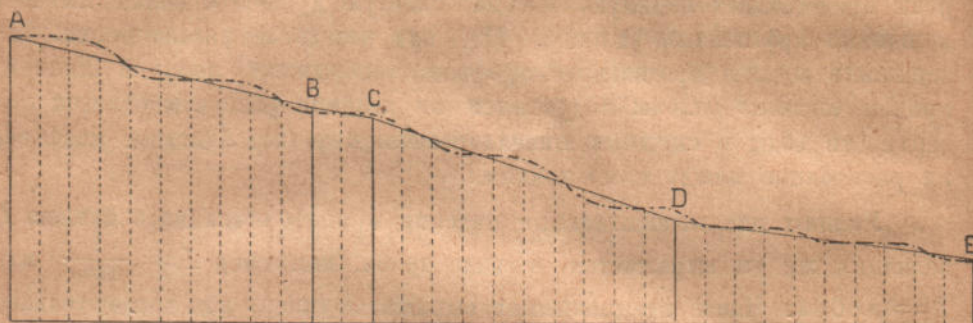
Действительный вид поверхности воды по направлению течения реки представляет плавную, весьма пологую кривую с большими или меньшими крутизнами уклонов. Но, как результат нивелировки, поверхность воды в продольном профиле изображают ломаной линией, причем *частные уклоны* получаются от деления разности отметок поверхности воды в смежных нивелировочных точках (частное падение) на расстояние между ними точками.

Уклоны или относительные падения принято обозначать буквою I , величина же их выражается в виде дроби, например $I = \frac{1}{2500}$ или $I = 0,0004$. Часто предпочитают выражать уклон или относительное падение реки в виде абсолютной величины падения на единицу измерения длины реки. Таким образом, при метрической системе уклон $I = 0,0004$ условно обозначают $0,4\text{‰}$; это значит, что на один километр длины реки абсолютная величина падения составляет 0,4 метра. В русских измерениях ту же величину уклона можно выразить, как 0,2 сажени на 1 версту ($0,2 \frac{\text{с.лс.}}{\text{вр.}}$).

Продольный уклон поверхности воды в реках вообще невелик. Он неодинаков не только для разных рек, но и для каждой реки в разных местах по ее длине, причем в каждом месте реки уклон не остается постоянным при изменениях высоты уровня воды. Наиболее крутые уклоны свойственны участкам рек в горных областях, где наблюдаются уклоны до 0,01 и еще более крутые. В местностях холмистых уклоны смягчаются, а в равнинных и низменных местностях уклоны столь пологи, что иногда едва ощутимы, выражаясь в сотых, тысячных и миллионных долях.

Так как большие реки часто берут свое начало в гористых местностях и, проходя последовательно через понижающиеся местности, спускаются к морю по низменным равнинам, то верхняя часть такой реки обыкновенно отличается крутыми и сильно меняющимися уклонами; в средней части уклоны более постоянны и пологи, а низовые участки реки имеют едва заметные уклоны. Некоторые большие реки Европейской России (Волга, Днепр, Западная Двина и др.), вытекающие с плоской возвышенности и проходящие по более или менее ровным местностям, не имеют горных областей; уклоны в верховьях этих рек хотя и более значительны, чем средние уклоны на остальном

протяжении, но сравнительно с другими реками не столь велики¹⁾. Тем не менее и на таких реках бывают крутые уклоны на отдельных участках, вследствие встречающихся неоднородных грунтов по степени их сопротивляемости размыву. Примером могут служить порожи́стые части р. Западной Двины (ниже гор. Двинска, между м. Менкеногоф и г. Фридрихштадт) и р. Днепра (между гг. Екатерипославом и Александровском), где уклоны достигают весьма значительных величин.



Черт. 15.

Величина поверхностных уклонов реки находится в зависимости от многих, вообще, обстоятельств. В числе их главнейшими являются: общий рельеф местности, свойства грунта, многоводность течения, впадающие притоки, очертания русла реки и проч. Следует заметить, что постоянная сила, приводящая воду реки в движение, обуславливается продольным уклоном реки (см. § 4). Под влиянием постоянной силы вода текла бы с возрастающей скоростью, если бы она не испытывала сопротивлений течению. Этими сопротивлениями являются, главным образом, сопротивления ложа реки, которые зависят от свойств грунта и от величины скоростей течения. Течение становится равномерным, когда движущая сила уравнивается силою сопротивлений. Исходя из этого можно было бы заключать, что определенным качествам грунта соответствовал бы определенный поверхностный уклон реки. Но обстоятельства речного течения более сложны. Под влиянием текущей

¹⁾ Уклоны и падения р. Волги, которая по характеру естественных условий течения может быть разделена на 7 частей, выражаются следующими величинами:

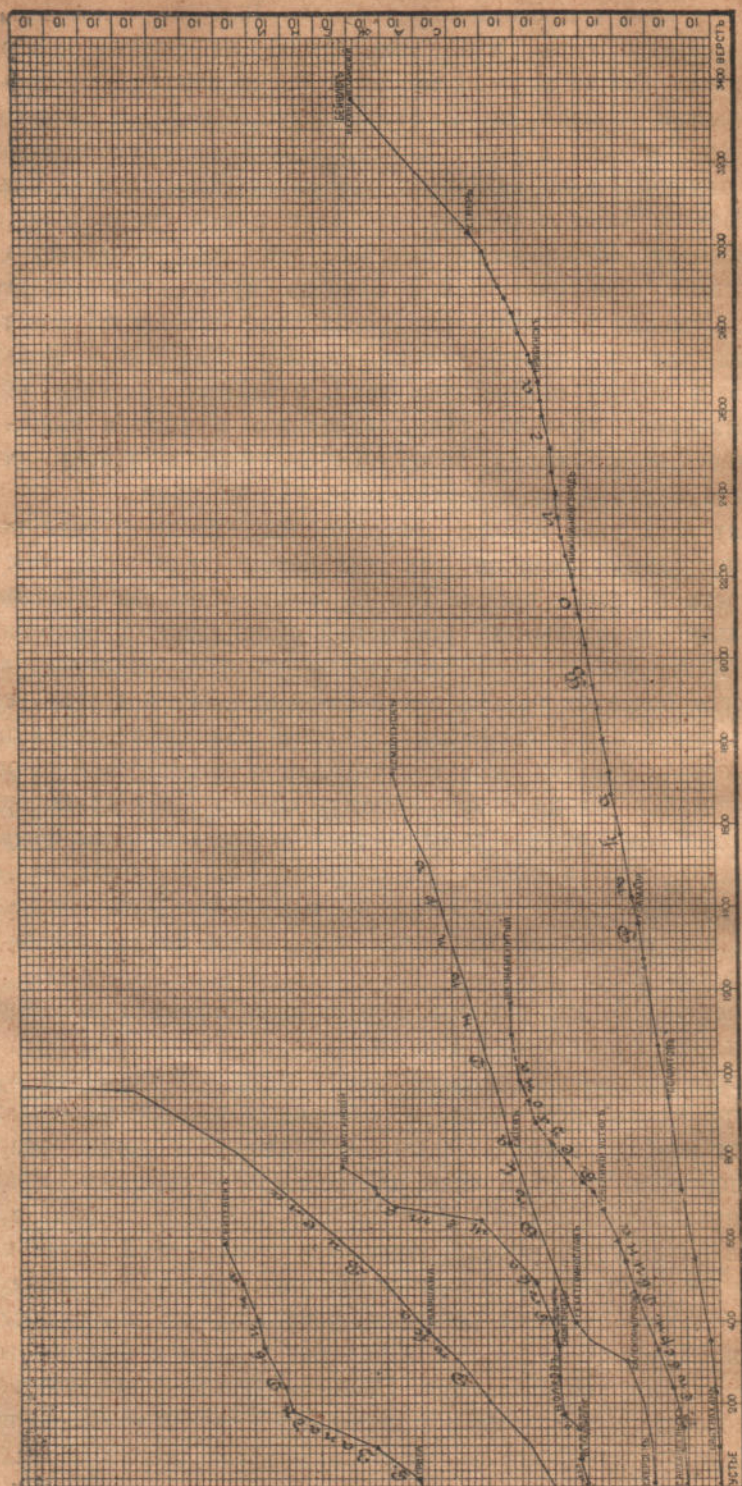
	Длина участка.	Абсолютная величина падения	Средний уклон.
1) От истоков до г. Твери	420 вер.	35,00 саж.	0,00017
2) „ г. Твери до г. Рыбинска.	366 „	20,90 „	0,00011
3) „ г. Рыбинска до г. Юрьевца	320 „	5,50 „	0,00003
4) „ г. Юрьевца до г. Нижн.-Новгорода	132 „	4,00 „	0,00006
5) „ Н.-Новгорода до ви. р. Камы	447 „	11,75 „	0,00005
6) „ ви. р. Камы до рукава Ахтубы	1.116 „	23,50 „	0,00004
7) „ Ахтубы до г. Астрахани	478,5 „	5,00 „	0,00002

воды происходит размыв русла и отложение наносов. Тем самым может меняться сила сопротивления течению. Размывы и наносы, кроме того, деформируют русло, что тоже влияет на уклоны поверхности воды. Размывающая сила реки меняется с изменениями не только величин скоростей течения, но и объема текущей воды, а следовательно и высоты уровня воды в реке. Характер движения паводков тоже не может не отражаться на величинах поверхностных уклонов. Как выше было объяснено, паводок движется в виде волны (черт. 14); подъем воды происходит обыкновенно быстрее, чем спад, и потому поверхностные уклоны при наступлении паводка круче, чем при его прохождении. Сужения и расширения русла тоже влияют на поверхностные уклоны, так как сжатие потока, подобно тому как и возвышение дна, вызывает подпор поверхности воды, а расширение имеет обратное влияние. Наконец, притоки реки, вносящие в реку и новые массы воды и наносные отложения, тоже, по упомянутым причинам, не могут не оказывать влияния на поверхностные уклоны реки.

В силу всех этих причин поверхностные уклоны в реке не представляют постоянных величин как для разных мест реки, так и для каждого места в разное время. Тем не менее отдельные участки реки, даже довольно значительных протяжений, обыкновенно характеризуются более или менее однородными величинами уклонов. Находясь в зависимости всего более от рельефа местности и от свойств грунта, средняя величина уклонов или относительное падение заметно меняется при переходе из одного участка реки в другой, если упомянутые условия на смежных участках весьма отличны между собою. Поэтому поверхность воды в продольном профиле реки состоит обыкновенно из ряда главных переломов, как показано на чертеже 15. Переход от одного участка к другому может происходить или более или менее резко (точка *D*), или постепенно на более или менее значительном протяжении (участок *BC*).

На черт. 16 изображены продольные профили некоторых из главнейших рек Европейской России.

Что касается положения поверхности воды в поперечном профиле реки, то при правильном русле и спокойном течении уклоны в этом направлении вообще незначительны. У вогнутых берегов, вследствие центробежной силы текущей воды, поверхность ее несколько приподнимается, напротив у выпуклого берега, где скорости течения меньше, поверхность опускается, почему образуется поперечный уклон поверхности воды от вогнутого берега к выпуклому. К местам, где сосредоточены наибольшие скорости (стрежень реки, см. § 4), поверхность воды несколько повышается. В крутых извилинах реки при быстром течении поперечные уклоны увеличиваются. Особенно велики и неправильны поперечные поверхностные уклоны в порожистых частях реки, на перекатах и вообще в местах, где форма речного русла весьма неправильна.

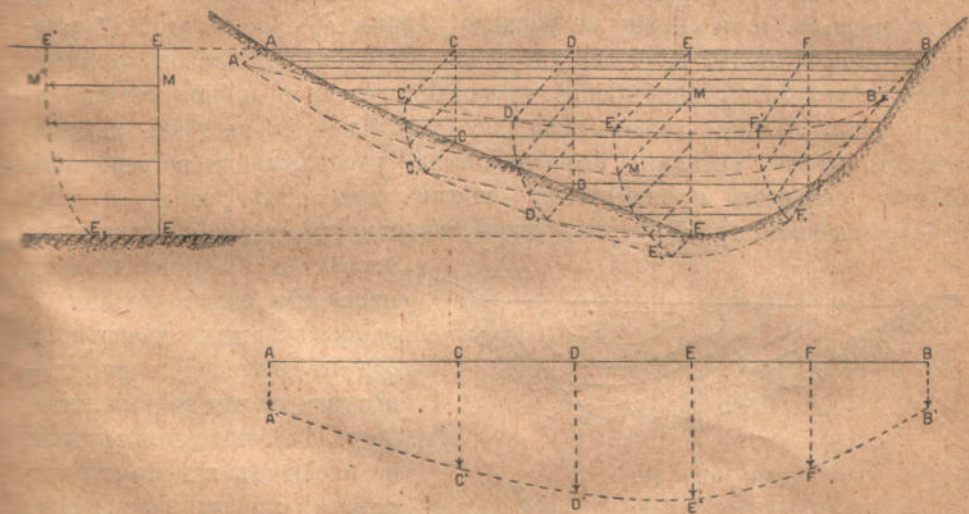


§ 4. Скорости течения.

Если представить себе, что река в некотором месте рассечена плоскостью, перпендикулярною к направлению течения (черт. 17), то площадь $ABFEDC$, занятая водою, называется *живым сечением реки* в данном ее месте. Граничащая эту площадь линия дна $ACDEFB$ называется *смоченным периметром* живого сечения реки, а отношение величины площади живого сечения к величине смоченного периметра называется *гидравлическим радиусом* живого сечения реки. Условившись обозначать площадь живого сечения через F , длину смоченного периметра через P , а величину гидравлического радиуса через R , имеем

$$\frac{F}{P} = R.$$

Длина пути, совершаемого в течение 1 секунды элементарной частицей воды при прохождении ею живого сечения в какой-либо точке последнего, называется *скоростью течения* в данной точке живого сечения реки. Объем воды, протекающей в одну секунду через живое сечение, называется *расходом воды* в данном месте реки.



Черт. 17.

Скорости течения в любой точке живого сечения могут быть измерены непосредственно, с некоторым пределом точности, помощью специальных для того инструментов (см. § 5). При этом оказывается, что скорости течения вообще неодинаковы для разных точек живого сечения. Если допустить параллелоструйность течения речного потока, то изме-

ренные величины скоростей течения в разных точках живого сечения можно изобразить в виде соответствующей длины перпендикуляров, восставленных к плоскости живого сечения в данных ее точках. Вообразим, что плоскость живого сечения пересечена рядом перпендикулярных к ней вертикальных и горизонтальных плоскостей; пусть в точках пересечений этих плоскостей измерены скорости течения и их величины отложены (черт. 17) на перпендикулярах EE' , MM' , DD' и т. д. Если число таких точек весьма велико, то линии (в пределе кривые), соединяющие вершины перпендикуляров в вертикальных или горизонтальных плоскостях выразят изменения величин скоростей в соответствующих плоскостях.

Результаты изучения скоростей течения показывают, что как в горизонтальных, так и вертикальных плоскостях, изменения величины скоростей течения выражаются кривыми, близкими к параболе, причем скорости течения уменьшаются к берегам, а в вертикальных плоскостях ко дну.

Засим, если вообразить, что через вершины всех перпендикуляров проведена обертывающая поверхность, то объем тела, заключенного между этой поверхностью и плоскостью живого сечения, представит тот объем воды, который протекает в одну секунду через живое сечение реки, т. е. величину ее расхода. Точка M' упомянутой обертывающей поверхности, наиболее удаленная от плоскости живого сечения, соответствует месту наибольшей скорости течения в данном живом сечении реки. Линия, соединяющая последовательно такие точки каждого смежного живого сечения, выразит линию расположения в реке наибольших скоростей и называется *динамической осью* речного потока. От сечения упомянутой обертывающей поверхности рядом вертикальных



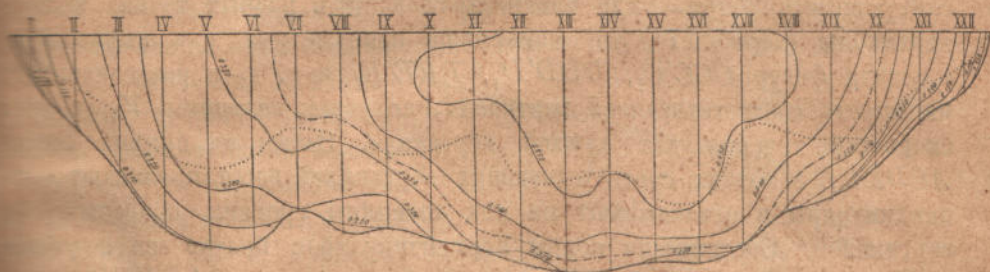
Черт. 18.

плоскостей, параллельных плоскости живого сечения и расположенных на равных одна от другой расстояниях, — получается ряд кривых линий (черт. 18), проекции которых на плоскость живого сечения выразят кривые равных ско-

ростей течения — *изотакхи*. Так как русло реки в разных поперечных сечениях не одинаково и не вполне симметрично, а в продольном направлении не прямолинейно на больших протяжениях, причем меняются уклоны дна и поверхности воды, то динамическая ось располагается обыкновенно по кривой линии, а изотакхи не представляют собою линий вполне симметричных. В вертикальном направлении эти отклонения динамической оси незначительны; хотя в вертикальной плоскости наибольшие скорости располагаются несколько ниже поверхности воды, но разница между абсолютными величинами скоростей, на одной

вертикали, наибольшей и на поверхности воды вообще незначительна, в особенности, если живое сечение очень развито в ширину сравнительно с глубиной. Поэтому в некоторых случаях можно принимать, что наибольшая скорость течения находится на поверхности воды. В горизонтальном направлении динамическая ось бывает далеко не параллельна общему направлению течения реки. В расположении динамической оси заметно стремление к местам наибольших глубин дна реки; в извилинах реки она приближается к вогнутым берегам, удаляясь от выпуклых. На отклонения динамической оси имеют также влияние местные препятствия течению: отмели, расширения русла, искусственные сооружения и проч. Расположение в плане как динамической оси, так и линий равных скоростей, обыкновенно меняется при разных положениях уровня воды в реке.

$$\begin{array}{lll} P = 10.19 & Q = 1282.9 & F = 3443.6 \\ V = 0.373 & V_{\max} = 0.494 & J = 0.000026 \\ R = 3.90 \end{array}$$



ростей течения для определенной линии на плоскости живого сечения или для всего живого сечения.

А именно:

$V_0 = \frac{\sum v_0 \Delta b}{b}$ — средняя скорость течения на поверхности, причем b есть ширина реки на поверхности воды, а v_0 — действительные скорости на поверхности воды в точках, равно удаленных друг от друга на величину Δb *).

$V_n = \frac{\sum v_n \Delta h_n}{h_n}$ — средняя скорость на данной (n -ой) вертикали, представляющей глубину h_n .

$V_s = \frac{\sum v_s \Delta P}{P}$ — средняя скорость на дне при длине периметра P .

V — средняя скорость для всего живого течения.

С последней величиной всего чаще приходится иметь дело. Величина средней скорости получится, если разделить величину расхода воды Q на величину площади живого сечения **), т. е. $V = \frac{Q}{F}$.

Для определения средней скорости течения можно пользоваться следующим приемом. Если измерены скорости в разных точках каждой вертикали (черт. 17), то, измеривши планиметром или вычисливши площади фигур $CCC'C_1$, $DDD'D_1$, $EEE'E_1$ и т. д. и разделивши их на высоту соответствующей вертикали, получаем величины V_n средних скоростей течения для каждой вертикали. Затем на прямой линии $ACDEFB$ в точках соответствующих вертикалей восстанавливают перпендикуляры и откладывают на них величины средних скоростей сих вертикалей. Соединивши концы перпендикуляров получается подобная же фигура. Делением ее площади на длину линии $ACDEFB$ получается средняя скорость течения V для всего живого сечения реки.

Непосредственное измерение (приборами) скоростей течения в многочисленных точках живого сечения реки представляет трудную работу, требующую продолжительного времени. К тому следует заметить, что во многих случаях результаты сих измерений все-же не будут

*) Величина V_0 может быть тоже определена разделивши на величину b (ширины реки) величину площади фигуры, которая получится, если к прямой линии, изображающей ширину реки на поверхности, восстановить перпендикуляры в точках, где измерялась скорость на поверхности, отложить величины скоростей на сих перпендикулярах и соединить вершины последних прямыми линиями.

Подобным же способом может быть определена V_n — средняя скорость данной вертикали и V_s — средняя скорость на дне реки.

**) Величина средней скорости течения для всего живого сечения реки может быть тоже исчислена как среднееарифметическая величина из всех измеренных скоростей в точках сего сечения, для чего необходимо, чтобы точки эти были взяты на равных друг от друга расстояниях как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях, т. е. чтобы каждая измеренная скорость выражала как бы среднюю скорость равновеликих частей, на которые разделена вся площадь живого сечения реки. Чем больше взято таких точек, тем точнее будет определена величина средней скорости.

служить точным выражением величин скорости течения в разных точках живого сечения реки при данном положении высоты уровня воды, если в период времени, затраченного на производство измерения, упомянутый уровень менял свое положение, причем, конечно, несколько изменялись и действительные величины скоростей течения в каждой точке живого сечения. В некоторых случаях задача непосредственного измерения скоростей течения, для исчисления средних величин, становится слишком трудной, почти не выполнимой. Так, например, при высоком уровне воды в весеннее половодье, когда течение реки разбросано по разливам, не всегда возможно даже выбрать сколько-нибудь правильное направление площади живого сечения; вместе с тем при таком состоянии реки высота уровня воды меняется весьма быстро, заметно прибывая, или падая иногда в течение каждого часа.

В виду сего при разрешении разнообразных технических вопросов в деле устройства и улучшения водных путей часто бывает необходимым определять величины скоростей течения теоретически. Для этого пользуются теоретическими выводами, выражающими зависимость между гидродинамическими элементами потока в открытом правильном и неразмываемом русле, а также эмпирическими формулами, предложенными некоторыми исследователями на основании сделанных наблюдений.

Уравнение неравномерного течения в открытом канале может быть представлено в следующем виде:

$$\frac{dz}{ds} = I = \frac{P}{F} b \cdot v^2 + a \frac{d}{ds} \left(\frac{v^2}{2g} \right) \dots (1)$$

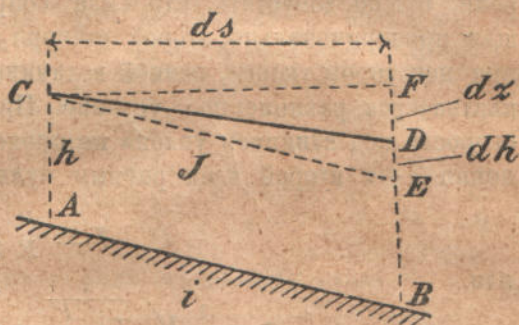
где, для сечения A (черт. 20) F обозначает площадь живого сечения, P —смоченный периметр русла, v —среднюю скорость течения, I —уклон поверхности воды; b и a обозначают коэффициенты, а g —ускорение силы тяжести.

При большой, сравнительно с глубиной, ширине русла гидравлический радиус $R = \frac{F}{P}$ выражает среднюю глубину, обозначенную через h .

Если на элементарной длине ds дно канала имеет однообразный уклон i , надение поверхности воды $FD = dz$, приращение средней глубины dh , то $DE = FE - DF$, или $dz = Ids = ids - dh$, откуда $I = i - \frac{dh}{ds}$. Пользуясь этими зависимостями можно уравнение (1)

представить в следующем виде:

$$dz = \frac{P}{F} b \cdot v^2 \cdot ds + \frac{a \cdot v \cdot dv}{g} \dots (2)$$



Черт. 20.

или

$$dz = \frac{bv^2}{R} ds + \frac{a \cdot v}{g} \frac{dv}{ds} \dots \dots \dots (3)$$

или

$$i - \frac{dh}{ds} = \frac{bv^2}{h} + \alpha \frac{d}{ds} \left(\frac{v^2}{2g} \right) \dots \dots \dots (4)$$

Заметим, что в вышеприведенном уравнении 1-ом выражение $\frac{P}{F} bv^2$ является выражением сопротивления, испытываемого течением воды. Сопротивления эти побеждаются силой движущей, т. е. силой давления воды, имеющей поверхностный уклон J .

Река, веками разрабатывая свое русло, приобретает при размываемых грунтах, в общем, пологие уклоны. Поэтому, рассматривая условия течения на некотором более или менее значительном протяжении реки, нужно допустить, что сила сопротивлений течению, возрастающая пропорционально второй степени скорости последнего, становится, при некотором уклоне, равной величине силы движущей, при чем устанавливается равномерное течение. При таком допущении приращения скорости под влиянием уклона не происходит, и, потому, полагая в уравнении 1-ом второй член равным нулю, получаем

$$J = \frac{P}{F} bv^2,$$

или

$$v = \frac{1}{b} \sqrt{J \cdot \frac{F}{P}} = C \cdot \sqrt{RJ} \dots \dots \dots (5),$$

или

$$v = C \sqrt{hJ} \dots \dots \dots (6)$$

где C обозначает коэффициент, который не остается постоянной величиной при разных условиях течения.

Для определения этого коэффициента многими исследователями были предложены разные выражения, основанные как на теоретических соображениях, так и на результатах опытов. В некоторых старых формулах предлагались, для определенных случаев, постоянные величины коэффициентов. Позднейшие исследования указали необходимость ставить величину коэффициента C в зависимость от свойств и вида материала, образующего поверхность русла, и от величины гидравлического радиуса R ; некоторые же исследователи вводят в формулу также и величину уклона J . Наиболее замечательные в этом отношении опыты были произведены Базеном и Дарси во Франции (на одном из водопроводных каналов Бургундского канала), Куннингамом в Индии (на верхнем Гангесском канале), Абботом и Гумфрейсом (на р. Миссисипи в Америке) и нек. др. Вообще нужно иметь в виду, что, применяя те или иные формулы для коэффициента C при исчислении средних скоростей на реках или каналах, следует сообразоваться, насколько условия данного случая соответствуют тем условиям, при которых производились опыты, послужившие основанием для той или иной эмпирической формулы с входящими в нее численными коэффициентами.

В настоящее время наиболее часто применяют формулу Дарси-Базена, новую формулу Базена, а также формулу Гангиля-Куттера.

Дарси и Базен, на основании упомянутых опытов, предложили следующую формулу для определения коэффициента C :

$$C = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \frac{\beta}{R}}}$$

где α и β численные коэффициенты, меняющиеся в зависимости от рода поверхности русла ¹⁾.

Впоследствии Базен, произведя новые многочисленные наблюдения над движением воды в открытых каналах, предложил новую формулу, при чем более удобную, как заключающую в себе только один численный коэффициент γ ²⁾:

$$C = \frac{87}{1 + \frac{\gamma}{\sqrt{R}}}$$

Гангиле и Куттер, основываясь на изучении многочисленных опытов и наблюдений, пришли к заключению, что коэффициент C изменяется не только в зависимости от рода поверхности русла и величины гидравлического радиуса R , но и при изменениях величины уклона J , при чем дали следующую формулу (при измерениях в метрах):

$$C = \frac{23 + \frac{0,00155}{J} + \frac{1}{n}}{1 + \left(23 + \frac{0,00155}{J}\right) \frac{n}{\sqrt{R}}}$$

где величина коэффициента n зависит от рода поверхности русла ³⁾.

1) Значения коэффициентов α и β (при измерениях в метрах) для поверхностей:

- | | |
|--|-----------------------------------|
| 1) очень гладких (цементная штукатурка, строганное дерево и т. п.) | $\alpha=0,00015; \beta=0,0000045$ |
| 2) гладких (тесаный камень, кирпичная кладка, доски и т. п.) | $\alpha=0,00019; \beta=0,0000133$ |
| 3) менее ровных (бутовая кладка) | $\alpha=0,00024; \beta=0,0000600$ |
| 4) земляных | $\alpha=0,00028; \beta=0,0003500$ |

2) Значение коэффициента γ (при измерениях в метрах) для поверхностей:

- | | |
|--|---------------|
| 1) очень гладких (цементная штукатурка, строганное дерево и т. п.) . . . | $\gamma=0,06$ |
| 2) гладких (тесаный камень, кирпичная кладка, доски и т. п.) | $\gamma=0,16$ |
| 3) бутовой кладки (гладкой) | $\gamma=0,46$ |
| 4) для поверхностей различного рода: очень правильных земляных в плотном грунте; чисто вымощенные; грубая бутовая кладка . . . | $\gamma=0,85$ |
| 5) для каналов с земляным руслом при обыкновенных условиях | $\gamma=1,30$ |
| 6) для каналов с земляным руслом, представляющим особо сильные сопротивления | $\gamma=1,75$ |

3) Значения коэффициента n для поверхностей:

- | | |
|--|-----------|
| 1) очень гладких (цементная штукатурка, строганное дерево и т. п.) . . | $n=0,010$ |
| 2) гладких (тесаный камень, кирпичная кладка) | $n=0,013$ |
| 3) бутовой кладки обыкновенной | $n=0,017$ |
| 4) бутовой кладки грубой | $n=0,020$ |
| 5) земляных | $n=0,025$ |
| 6) гравелистых или несколько покрытых водорослями | $n=0,030$ |
| 7) гравелистых неровных и плохо содержимых | $n=0,035$ |
| 8) поверхностей очень неровных | $n=0,040$ |

Означенные формулы часто применяются при проектировании разнообразных речных сооружений и каналов. При этом в разных случаях приходится или определять среднюю скорость течения по данным величинам гидравлического радиуса и уклона, или, наоборот, подбирать величины последних по данной средней скорости. Так как подобные исчисления очень длительны, то для облегчения работы обыкновенно пользуются графиками или таблицами, специально для этой цели составленными по той или иной формуле.

Нередко встречается также надобность определять величину средней скорости течения, или наибольшей скорости около дна для данной вертикали или для всего живого сечения, располагая сравнительно немногими уже известными величинами скоростей течения в некоторых точках. Точного общего закона, по которому изменяются скорости течения в вертикальных и горизонтальных плоскостях, т. е. по глубине и по ширине реки, гидравликой не установлено. Поэтому для упомянутой цели пользуются построением кривых, вид которых многими исследователями этого вопроса определялся экспериментально исходя из теоретических соображений и пользуясь результатами произведенных измерений. Как выше было упомянуто, кривые изменения скоростей течения напоминают параболу.

Некоторые исследователи ¹⁾ принимали, что изменение скоростей течения по глубине на данной вертикали происходит по параболе с горизонтальной осью, расположенной несколько ниже поверхности воды. Следовательно, исходя из уравнения параболы $y^2 = Px$, имеем для двух точек вертикали, из коих одна на глубине t_z с известной скоростью V_z (например, на глубине соответствующей максимальной скорости V_{max}), а другая на большей глубине t_x с искомой скоростью V_x , следующее соотношение:

$$(t_x - t_z)^2 = P(V_z - V_x),$$

откуда

$$V_x = V_z - \frac{1}{P} (t_x - t_z)^2$$

или

$$V_x = V_{max} - \frac{1}{P} (t_x - t_z)^2.$$

Последующие исследования на реках Эльбе и Рейне указали на значительное расхождение параболы с действительным видом кривой изменения скоростей течения и выяснили, что лучшие результаты дает применение формулы логарифмической линии, с вертикальной осью,

$$V = a + b \lg_n x,$$

¹⁾ Дюшюи, Боало, Гумпфрейс и Аббот.

²⁾ Хаген принимал кривую изменения скоростей по вертикали за параболу с вертикальной осью, вершина которой находится на уровне дна, причем считал, что максимальная скорость находится на поверхности воды. При этом

$$V_x = V_s + \sqrt{P(t - t_x)},$$

где V_s есть скорость на дне.

Наибольшая скорость течения вообще расположена в пределах верхней трети глубины живого сечения и тем ближе к поверхности воды, чем меньше глубина реки по сравнению с ее шириной. Наименьшие скорости течения находятся у дна, причем из сих скоростей наибольшая бывает обыкновенно та, которая соответствует вертикали, где проходит динамическая ось потока.

Для определения, с грубым приближением, величины скоростей максимальной V_{max} , средней V и по дну V_s можно пользоваться соотношениями между этими скоростями, установленными некоторыми исследователями по опытным данным:

По Вагнеру, $V = \alpha V_{max}$, где коэффициент α находится в пределах от 0,67 до 0,78, возрастая с величиной реки, а для данного места реки — при возвышении уровня воды.

Зброжек, исходя из опытов Базена, полагает возможным применять для больших речных потоков малой глубины (сравнительно с шириной) следующие выражения приблизительной зависимости скоростей в плоскости динамической оси (при измерениях в метрах): средняя скорость $V = V_{max} - 14 \sqrt{RJ}$, а скорость по дну $V_s = V - 10 \sqrt{hJ}$, полагая, что в таких реках R — средний глубине h , а наибольшая скорость находится на поверхности воды.

На судоходных реках средние скорости течения вообще не велики. При скоростях течения $2-2\frac{1}{2}$ метр. в секунду взводное судоходство (т. е. вверх по течению) уже испытывает затруднения. Можно считать, что скорости, меньшие 0,5 метр, характеризуют слабое течение, скорости 0,5—1,5 метр. — умеренное, а 1,5—3 метр. — быстрое течение. В порогах, горьких участках реки и т. п. скорости течения достигают 4-х, 5-ти, иногда и более метров.

§ 5. Измерение скоростей течения.

При изучении свойств речного течения, равно как для определения расхода воды в реке производят измерения скоростей течения специальными для того приборами. В зависимости от требуемой точности и подробности такого исследования применяются разные приемы исследовательских работ и те или иные гидрометрические приборы или инструменты.

Ниже приведены краткие сведения лишь о главнейших типах приборов. Подробные описания разнообразных приборов, способов производства измерений и методов обработки их результатов можно найти в специальных сочинениях по гидрометрии ¹⁾.

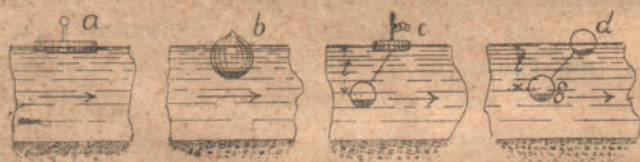
¹⁾ Например: „Приборы для определения скоростей и расходов воды в открытых руслах“, Н. Д. Тиликин.

„Hydrometrische Ermittlungen“—R. Jasmund. [смотри „Handbuch der Ingenieurwissenschaften“—III Teil, I Band (1906)].

Приборы, служащие для измерения скоростей течения, разнообразные по типам и конструкции, в общем могут быть разделены на две группы. К одной из них относятся всякого рода поплавки, которые пускаются к свободному движению по течению на том или ином определенном протяжении, причем по затраченному на прохождение сего пути времени они дают среднюю для этого участка скорость течения. К другой группе относятся все те специальные приборы, которые на время действия устанавливаются в определенной точке или вертикали живого сечения потока и помощью которых непосредственно измеряют скорость протекающих в этой точке частиц воды, причем некоторые из сих приборов дают возможность одним измерением определить среднюю скорость для всей вертикали.

К числу приборов, более часто употребляющихся, относятся следующие.

Поверхностные и глубинные поплавки. Их употребление основано на том допущении, что плавающее в воде небольшое тело принимает ту же скорость, как и текущая вода, в которой оно находится. Для этого тело должно быть избавлено от действия на него ветра, а, кроме того, оно должно иметь небольшой объем и вес, так как большие плавающие тела движутся быстрее воды. Поверхностный поплавок,



Черт. 21. Поверхностные и глубинные поплавки.

служащий для измерения скорости течения около поверхности воды, делается в виде деревянного диска (черт. 21—а), диаметром около 25—30 см. и толщиной до 5—7 см., посредине которого закреплен маленький металлический стержень с белым или красным флачком или с ярко окрашенным шариком. Часто поверхностный поплавок делается в виде ярко окрашенного деревянного или полого стеклянного, жестяного или медного шара, диаметром в 10—30 см. и такого веса, чтобы шар в большей своей части был погружен в воду (черт. 21—в). Глубинный поплавок служит для измерения скорости течения на произвольной глубине t (черт. 21-ый с и d). Для этой цели шар наполняется водой, песком или иной тяжестью настолько, чтобы его вес стал несколько тяжелее веса вытесняемой им воды, но вместе с тем чтобы шар мог поддерживаться на желаемой глубине t настолько маленьким поплавком с тонким шнурком или проволокой, чтобы действием потока на поплавок и нить можно было пренебречь и считать

скорость их общего с шаром движения за скорость течения на глубине шара. Поддерживающий поплавок можно заменить (черт. 21—d) тоже шаром (а) одинакового объема с шаром (б); в таком случае два скрепленные шара будут двигаться с некоторой скоростью V , средней из скорости течения V_0 на поверхности и скорости течения V_t — на глубине t . Если сначала пустить только один поверхностный шар (а) и таким способом измерять скорость течения на поверхности (V_0), то искомая скорость V_t определяется из равенства

$$V = \frac{V_0 + V_t}{2}, \text{ т. е. } V_t = 2V - V_0.$$

Оба способа имеют погрешности в отношении точного определения скорости течения на данной глубине: при первом способе, как выше упомянуто, игнорируется влияние поддерживающего поплавка и нити, при втором способе вычисление по средней скорости предполагает, что изменение скоростей течения по глубине происходит по закону прямой линии, между тем, как ранее объяснено, это изменение соответствует некоторой кривой линии.

Нужно, впрочем заметить, что измерение скоростей течения поплавками вообще не отличается большою точностью. Тем не менее, в виду простоты подобных приборов и легкости работы с ними, к ним прибегают часто, особенно в тех случаях, когда не требуется большая точность скоростных измерений на реке. За ними имеется еще то преимущество, что наблюдая пути движения поплавков и нанося их на план реки можно судить о направлениях струй речного потока, в чем нередко является надобность при разрешении тех или иных вопросов.

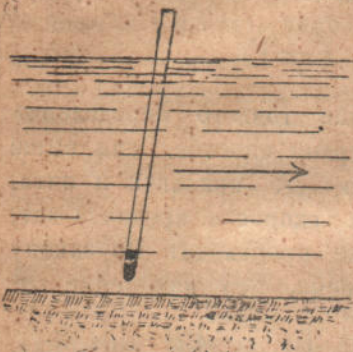


Черт. 22. Производство измерений скоростей течения помощью поплавков.

Производство измерения скоростей течения помощью поплавков обыкновенно организуется следующим образом. На данном участке реки (черт. 22) разбивается на равных расстояниях (обыкновенно около 50 саж.) три поперечные профили, обозначенные створными вехами и нанесенные на плане. С лодки, поставленной несколько выше (на 5—10 саж.) первой профили, пускаются один за другим поплавки и наблюдением трех стоящих против каждой профили наблюдателей измеряется время, затраченное на прохождение поплавком от I-й до II-й и от II-й до III-ей профилей. Одновременно, мензулой с кизрегелем, или другими инструментами, стоящими в створе первой профили, измеряются углы α_2 и α_3 в моменты, когда поплавок приходит в точки α_2 α_3 . Таким образом, определяется путь поплавка, его протяжение и затраченное на его

движение время, а, следовательно, в средняя на данном пути скорость. Засим, таким же способом производятся измерения скоростей, переводя лодку в положение *B*, *C* и т. д., чтобы получить скорость течения в разных местах по ширине реки. В каждом положении пускают, поочередно, несколько (3—5) поплавков, вычисляя потом среднюю их скорость.

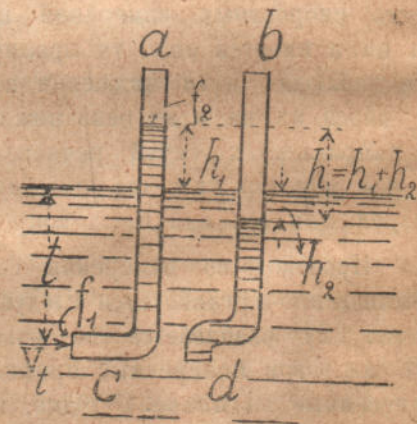
Гидрометрический шест. Применение этого прибора основано на таком же, как и для поплавков, допущении, что плавающее в воде тело принимает приблизительно одинаковую с течением воды скорость движения. Он состоит (черт. 23) из круглого деревянного шеста с тяжелым железным или свинцовым наконечником внизу, или из жестяной трубки, диаметром 3—4 см., с дном и крышкой, причем в нижнем конце трубка нагружается дробью или иной тяжестью. В том или ином виде шест делается такой длины и с такой тяжестью на конце, чтобы нижний конец погрузился до дна, но все же на таком от последнего расстоянии, при котором шест не задевал



Черт. 23.
Гидрометрический шест.

бы дна. В текущей воде, шест принимает несколько наклонное по направлению течения положение, так как скорости течения воды уменьшаются по мере приближения ко дну. По той же причине шест будет плыть со скоростью, приблизительно равной средней (по вертикали) скорости течения, почему гидрометрический шест может служить для измерения только средних скоростей течения. Производство измерений организуется подобно вышеописанному для поплавков.

Гидрометрические трубки, разных систем, относятся ко второй группе приборов, т. е. таких, которые измеряют скорость течения в данной точке живого сечения потока. Они основаны на том, что в изогнутой трубке *a* (черт. 24), опущенной в текущую воду на глубину t так, что нижнее отверстие *C* направлено против течения, происходит, от давления текущей воды на это отверстие, подъем воды в вертикальном колене трубки на высоту h_1 . Если назвать через f_1 площадь входного отверстия трубки, а через f_2 площадь поперечного сечения вертикального колена трубки, то при скорости течения V_t условие равновесия

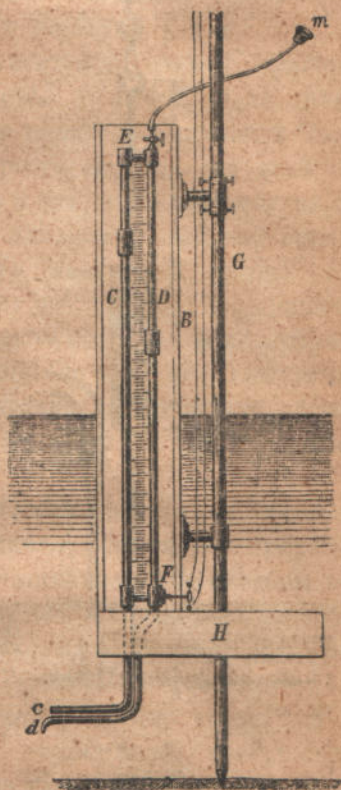


Черт. 24.

между гидравлическим давлением и весом столба воды h_1 определяется равенством $f_1 \frac{V_t^2}{2g} = f_2 h_1$, откуда искомая величина скорости $V_t = \sqrt{\frac{f_2}{f_1} \cdot 2g \cdot h_1} = \alpha_1 \sqrt{h_1}$, где α_1 есть постоянный коэффициент для данной трубки. На таком предположении и была первоначально сконструирована гидрометрическая трубка, получившая название трубки Пито, по имени ее изобретателя. В дальнейшем, опыты Дарси указали, что введенная в поток трубка нарушает движение струй и вызывает этим заметную потерю в высоте столба, соответствующего давлению воды. Величину этой потери можно приблизительно определить (черт. 24) если рядом с трубкой a поставить другую такую же трубку, но с отверстием d , направленным вниз (т. е. при положении площади отверстия параллельном течению). Величина потери напора будет приблизительно равна понижению воды h_2 , происходящему в этой последней трубке. Таким образом истинная высота напора $h = h_1 + h_2$, и скорость течения V_t определяется равенством $V_t = \mu \sqrt{h_1 + h_2} = \mu \sqrt{h}$, где μ есть коэффициент, свойственный данному, состоящему из двух трубок, прибору.

Встречающиеся ныне на практике гидрометрические трубки разных наименований различаются между собою по тем или иным конструктивным усовершенствованиям или по приспособлению данной системы трубки к определенным условиям или задачам измерения скоростей течения. Чаще других применяются трубки Дарси, а также трубки Риттера, представляющие видоизменение трубки Дарси.

В приборе Дарси (черт. 25) обе трубки C и D (имеющие каждая нижнюю часть медную, а верхнюю — стеклянную) прикреплены к доске B , на которой имеется миллиметровая шкала для отсчета разницы h между высотой столба воды в той и другой трубке. Доска B соединена шарнирами с вертикальной штангой G так, что, сохраняя свободу вращения в горизонтальной плоскости кругом штанги, она может быть в вертикальном направлении закреплена на определенной высоте для измерения скорости течения на желаемой глубине. Флюгер H , действием на него течения воды, ставит нижние колена трубок про-

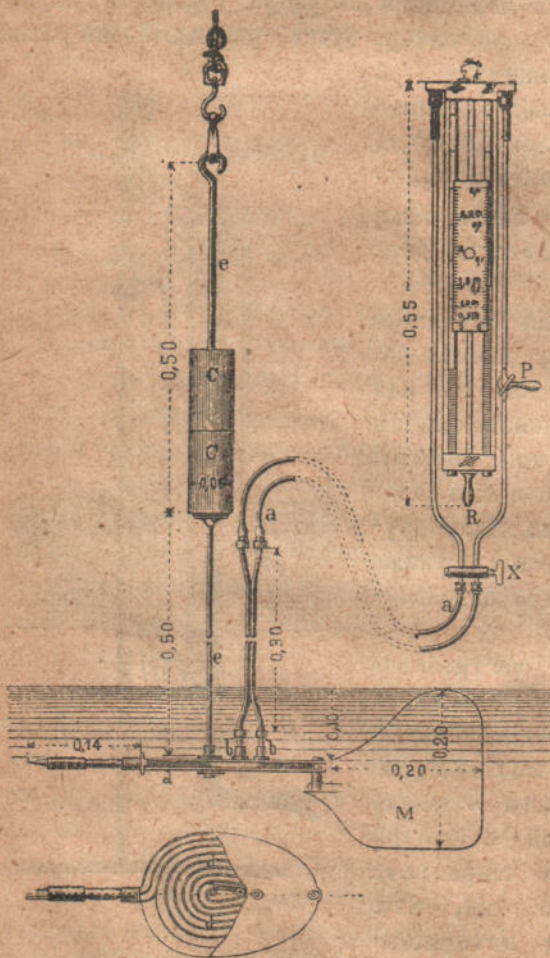


Черт. 25.
Гидрометрическая трубка Дарси.

тив течения. Концы стеклянных частей трубок одеты медными обоймами. У верхних обойм *E* трубки *C* и *D* сообщаются между собою. Краном, расположенным у нижних обойм *F*, можно закрыть или открыть сообщение стеклянных частей трубок с нижними медными их частями, причем поворот крана делается сверху помощью шнурков. На верху около обойм *E* имеется кран с гутаперчевой трубкой, кончающейся мундштуком *m*. Этим краном можно соединить или разобщить трубки с атмосферным воздухом, а помощью высасывания или вдувания воздуха через мундштук можно одновременно и одинаково в обеих трубках разредить или сгустить воздух.

Измерение скорости течения производится следующим образом.

В данной вертикали живого сечения потока ставится на дно штанга. Доску *B* устанавливают на штанге на такой высоте, чтобы нижнее отверстие с трубки *C* находилось на глубине, для которой требуется измерить скорость течения. Краны *E* и *F* открывают. Так как отверстие *d* направлено вниз, а отверстие *c* против течения, то в стеклянных трубках *C* и *D* вода будет стоять не на одинаковой высоте. Через мундштук высасывают воздух, вследствие чего вода в обеих трубках одинаково поднимается кверху. Высасывание продолжают до тех пор, когда вода в трубках поднимется на высоты, удобные для прочтения их по шкале. После сего кран *F* закрывают, и разность высот оставшихся в трубках столбов воды отсчитывается по шкале. Если глубина измерения так велика, что всю шкалу



Черт. 26. Гидрометрическая трубка Риттера.

приходится опустить в воду, то, вместо высасывания, вдувают воздух в

трубки; дальнейшие же действия те же, как и в первом случае, но для прочтения по шкале приходится поднять трубки из воды. Отсчитанная по шкале разность высот воды в трубках h вставляется в формулу $V = \mu \sqrt{h}$ для исчисления скорости течения.

В приборе *Риттера* (черт. 26) имеется, подобно прибору Дарси, тоже две трубки с неодинаковым устройством их нижних отверстий, но штанга заменена подвеской e с грузом C , внизу которого и подвешены нижние (медные) части d трубок, а также направляющий их флюгер M . Стекланные трубки со шкалою подвешены отдельно, причем стеклянные трубки соединяются с медными помощью гибких каучуковых трубок a , наполненных воздухом. В стеклянные трубки налита легкая жидкость. Медные трубки свернуты спиралью (смотри разрез). Давление воды в отверстиях медных трубок передается сжатием воздуха, находящегося в каучуковых трубках, к жидкости в стеклянных трубках, положение которой и отсчитывается по шкале. Означенная конструкция облегчает производство измерений на разных глубинах, притом и в глубоких реках.

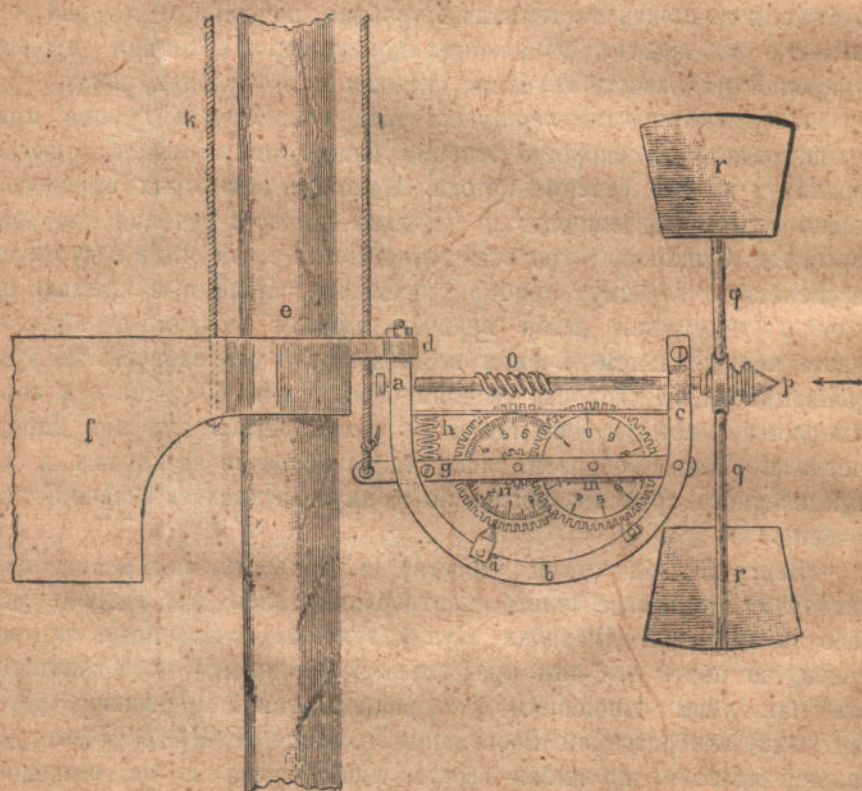
Гидрометрические вертушки тоже относятся к группе приборов, помощью которых скорость течения измеряется в любой точке данной вертикали живого сечения потока. Помощью некоторых приспособлений можно вертушкой измерить и среднюю скорость течения для всей этой вертикали. Сущность устройства заключается в том, что в воду опускается на желаемую глубину прибор, имеющий наклонные крылья, причем, подобно тому, как ветер вращает крылья мельницы, крылья вертушки под действием течения воды вращают ось; скорость же вращения пропорциональна скорости течения воды. Число оборотов оси вертушки измеряется автоматически помощью находящегося при ней аппарата — счетчика. Таким образом, зная число оборотов сделанных в течение определенного времени, можно по формуле исчислить величину скорости течения.

Вертушки, благодаря удобству и точности измерения, являются приборами, наиболее часто употребляющимися при гидрометрических работах на реках и каналах. Существуют многочисленные системы вертушек, но почти все они представляют результаты последовательных в том или ином отношении усовершенствований первоначального типа вертушки, изобретенной Вольтманом в конце XVIII-го столетия, получившей название по имени своего изобретателя и не вышедшей из употребления до настоящего времени. Из числа более совершенных типов, ныне чаще других применяются вертушки Амслера и Гарляхера.

Вертушка *Вольтмана* изображена на чертеже 27.

По гладкой деревянной или металлической штанге e , поставленной (с лодки, плота, моста и т. п.) вертикально на дно реки в данной вертикали, опускается помощью шнура k подвешенная на нем вертушка на желаемую глубину от поверхности воды. Под действием течения на флюгер (руль) f , ось вертушки op , к которой прикреплены крылья r

самостоятельно становится прямо против течения и в таком положении приходит во вращательное движение с равномерной скоростью. В желаемый момент, потянувши сверху шнур *l* можно прижать зубчатое колесо автоматического счетчика к бесконечному винту *o*, находящемуся на оси вертушки, и с этого момента счетчик начинает отсчитывать число оборотов вертушки. Через определенное время, например через одну или две минуты, наблюдатель ослабляет шнур *l*; в тот же момент счетчик отжимается, действием пружины *h*, от оси и перестает действовать. Для прочтения по счетчику числа сделанных за упомянутый промежуток времени оборотов оси вертушки прибор помощью шнура *k* поднимается по штанге из воды к наблюдателю. Засим по формуле исчисляется скорость течения.

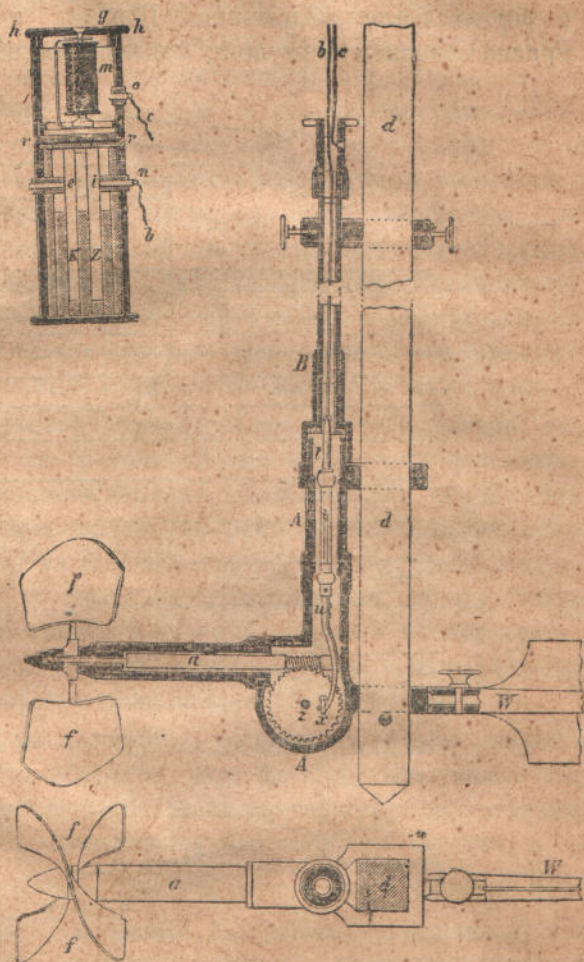


Черт. 27. Вертушка Вольмана.

У опытного наблюдателя исправная вертушка Вольмана дает довольно точные результаты измерений. Но она обладает некоторыми недостатками и не удовлетворяет некоторым требованиям, которые в том или другом случае предъявляются к измерениям скоростей течений: например, теряется много времени на подъем прибора для прочтении

вания показаний счетчика; нельзя вертушкой измерить скорость течения воды по направлению, нормальному к плоскости живого сечения, если струя течения в данной точке не совпадает с этим направлением, так как ось вертушки всегда находится по направлению максимальной скорости, а не по направлению проекции последней на нормаль к живому сечению.

В вертушке Амслера (черт. 28) применен электрический сигнальный аппарат для устранения необходимости вынимать прибор из воды для прочтения на счетчике числа оборотов. С этой целью в приборе имеется контактная пластинка *и*, которая через каждые 100 оборотов оси вертушки, или, соответственно, при каждом полном обороте колеса *z*, соприкасается с помещенным на боковой поверхности последнего металлическим штифтом *x*, вследствие чего замыкается ток и раздается звонок в особом аппарате, соединенном гибкими проводами с вертушкой и находящемся наверху около наблюдателя. Конструкция прибора позволяет применять его и без электрического показателя по выше описанному способу, т. е. прочтением на счетчике сделанного, в определенное число минут, числа оборотов. К другим усовершенствованиям прибора Амслера относятся особые устройства для установки вертушки на любой глубине под водой. Для ряда последовательных измерений на разных глубинах одной вертикали без вынимания вертушки из воды, — вертушка для дви-

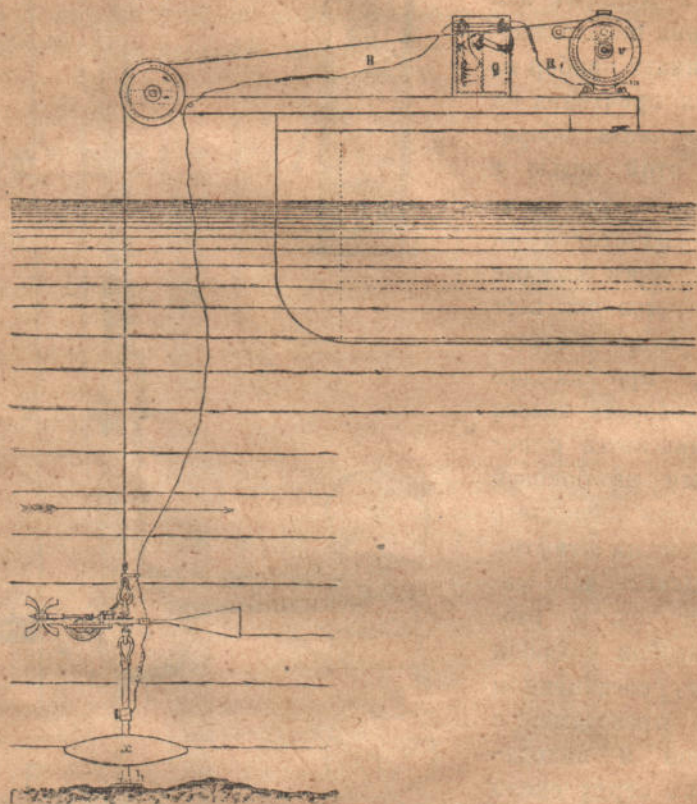


Черт. 28. Вертушка Амслера.

жения по выше описанному способу, т. е. прочтением на счетчике сделанного, в определенное число минут, числа оборотов. К другим усовершенствованиям прибора Амслера относятся особые устройства для установки вертушки на любой глубине под водой. Для ряда последовательных измерений на разных глубинах одной вертикали без вынимания вертушки из воды, — вертушка для дви-

жения по штанге подвешена к тонкому бронзовому проволочному канату, который накручивается на ворот, прикрепленный к штанге выше поверхности воды. По длине каната, намотанного на барабане ворота или разматанного, можно во всякое время знать глубину погружения оси вертушки под уровнем воды.

При производстве измерений на больших глубинах или при очень больших скоростях течения употребление штанг становится затруднительно, так как штанга изгибается и, кроме того, трудно ее удерживать в вертикальном положении. Поэтому в таких случаях пользуются приспособлением вертушки, показанным на чертеже 29-м.



Черт. 29.

Вертушка подвешена к гибкому проволочному канату, перекинутому через блок и накручиваемому на барабан *в*, помещенный на лодке. Ниже вертушки подвешен тяжелый диск *х*. Под диском имеется подушка *h*, так устроенная, что в момент ее прикосновения ко дну замыкается ток и раздается звонок, указывающий, что аппарат опущен до дна. Зная расстояние между подушкой и вертушкой можно по числу оборотов барабана измерить глубину дна и, засим устанавливать вертушку для измерения скоростей течения на любой глубине и высоте от дна.

В остальном, измерения производятся так же, как описано выше, помощью электрического звонка, определяющего время, потраченное на 100 оборотов вертушки.

Прибор *Гарляхера*, в общем сходный с прибором Амслера, представляет наиболее полные усовершенствования для измерения скоростей течения помощью вертушек. Между прочим, прибор Гарляхера приспособлен для измерения скоростей течения по направлению нормальному к плоскости живого сечения реки. С этой целью сопряжение вертушки со штангой устроено таким образом, что вертушка, при ее перемещениях для измерения скоростей в разных по глубине точках данной вертикали, скользит по штанге при подымании или опускании, но не может вращаться на штанге, как на оси, а потому вертушка, оставаясь перпендикулярной к штанге, не изменяет своего положения и в горизонтальной плоскости. Для ориентирования же прибора по отношению плоскости живого сечения на штанге вверху закреплены две визирки, расположенные в вертикальной плоскости, перпендикулярной к вертикальной плоскости, проходящей по оси вертушки. Установивши штангу вертикально и так повернувши ее около своей оси, чтобы визирки стали по створу в плоскости живого сечения, тем самым устанавливается и ось вертушки перпендикулярно к плоскости живого сечения реки.

Кроме того прибор Гарляхера приспособлен для определения, одним измерением, средней скорости течения для всей данной вертикали. Для этого прибор снабжен приспособлениями, позволяющими передвигать вертушку с равномерною скоростью от дна реки до поверхности воды или обратно. Если во все время такого перемещения вертушка и счетчик находились в действии, то разделивши полученное общее число оборотов вертушки на число секунд в течение времени ее вертикального перемещения, получается среднее число оборотов в одну секунду, соответствующее средней скорости течения для всей вертикали.

Что касается формулы, по которой вычисляется величина скорости течения по числу измеренных оборотов вертушки, то все упомянутые вертушки основаны на одном принципе, выше уже упомянутом, а именно, что число оборотов вертушки пропорционально скорости течения, т. е. что $\frac{v}{n} = \beta$, где v — скорость течения, n — число оборотов вертушки в одну секунду, а β — численный коэффициент, постоянный для данной вертушки. Но так как каждая вертушка обладает некоторой степенью чувствительности, т. е. нужна некоторая хотя бы очень малая скорость течения для того, чтобы данная вертушка начала вертеться, то формула приобретает следующий вид $V = \alpha + \beta n$, где α и β — постоянные для данной вертушки численные величины. Величина α по сравнению с β очень мала, почему при больших скоростях течения можно без чувствительной погрешности в вычислении величины скорости пренебрегать коэффициентом α .

Таким образом, как в формуле гидрометрических трубок ($v = \mu \sqrt{h}$), так и в формуле гидрометрических вертушек ($v = \alpha + \beta n$) заключаются численные коэффициенты μ , α и β , величины которых должны быть известны для каждого данного экземпляра прибора. Определение сих коэффициентов, т. е. *тарирование прибора* необходимо с течением времени повторять, так как в зависимости от износа инструмента и по другим причинам величина коэффициентов может несколько изменяться. Тарирование производится в специальных лабораториях (испытательных станциях); с меньшей точностью можно тарировать прибор и самостоятельно, не обращаясь к упомянутым испытательным станциям. Для тарирования нужно заставить действовать испытываемый прибор при таких условиях, когда скорость течения v является величиной известной. Тогда, по наблюденному для гидрометрических трубок показанию разности уровней в трубках h , а для вертушки числу оборотов вертушки в секунду — n , можно по формуле исчислить коэффициент μ или α и β . Опыт должен быть повторен много раз, чтобы определить величину коэффициента как среднюю из величин, получающихся по результатам каждого измерения. Для вычисления коэффициентов по данным многократно повторенного опыта, обыкновенно, пользуются способами наименьших квадратов.

Чтобы при тарировании располагать уже известной величиной скорости v , можно поступать двояко: или производить наблюдения тарირуемым прибором в текущей воде, скорость течения которой одновременно измеряется другим точно уже тарированным прибором или определяется иным способом (например в канале по расходу воды и площади живого сечения); или же заставляют тарированный прибор двигаться с определенной скоростью, причем скорость движения прибора считается вместо скорости течения воды. Последний способ, чаще всего применяющийся, осуществляется в простейшем виде обыкновенно следующим образом. Над прудом или иным бассейном стоячей воды протягивается мерный канат, имеющий на равных расстояниях, например через каждые 5 саж., ясно видимые отметки (привязанные бляшки с надписями, цветные лоскутки и т. п.). Вдоль каната двигают с возможно равномерной скоростью лодку помощью другого каната или веслами. С лодки опускают во время ее движения прибор и, замечая пройденный путь и время, вычисляют среднюю скорость движения прибора во время его действия в воде. Вместо мерного каната, иногда пользуются створами вех: продольным створом для направления лодки, а несколькими на равных расстояниях поставленными поперечными створами — для измерения длины пути лодки.

§ 6. Расход воды в реке.

Расходом воды называется количество ее, протекающее в одну секунду через данное живое сечение реки. Как выше сказано, вели-

чина расхода воды равна объему тела, изображенного на чертеже 17. Поэтому, если произведены непосредственные измерения скоростей течения в достаточном, для желаемой точности определения расхода, числе точек каждой вертикали и при достаточной близости взятых для сего вертикалей, то исчисление величины расхода воды сводится к определению объема упомянутого тела. Определение же объема производится разными способами, вообще применяющимися для приблизительного исчисления объема тел, имеющих кривую поверхность. В данном случае можно, например, определять объем по известным площадям фигур CCC_1C' , DDD_1D' и т. д., или по площадям фигур, ограниченных изотаксами. При уже известных величинах площади живого сечения и средней скорости течения, расход воды определяется перемножением этих двух величин, т. е. $Q = F V$.

Если расход воды исчисляется на основании непосредственных измерений площади живого сечения и скоростей течения, то для точности определения расхода необходимо избирать такое место реки, где можно верно определить направление живого сечения (оно должно быть перпендикулярно течению) и где течение воды совершается правильно в общей массе, без больших разниц в величинах скоростей. Поэтому следует, по возможности, выбирать такие участки реки, где она течет в одном русле без разделения на рукава, где она прямолинейна или, по крайней мере, не имеет крутых извилин, где в поперечной профили русло представляет плавные очертания, и т. п. При высоких уровнях воды в реке, для точности определения расхода, следует избирать такие участки, где не происходит широких разливов, т. е. где весеннее русло заключено в достаточно крутых и правильных берегах.

Для маленьких рек иногда применяют иные способы определения расхода воды, не прибегая к промерам глубин и измерениям скоростей течения. Так, например, пользуются существующей плотиной и, если она достаточно водонепроницаема, устраивают на ней водослив, чтобы определить расход воды по формулам истечения воды через водослив. Имеются примеры применения химического метода измерения расходов воды, сущность которого заключается в следующем: в речной поток вводится раствор какого-либо вещества, напр. хлористого натрия, а затем ниже по течению берется проба воды, в которой одним из методов анализа определяется содержание введенного вещества; если q — расход в единицу времени раствора вводимого в поток, C — крепость или степень концентрации раствора, c — степень концентрации введенного раствора в исследуемой пробе, а Q — искомый расход, то существует зависимость $q : Q = c : C$, откуда $Q = \frac{q \cdot C}{c}$.

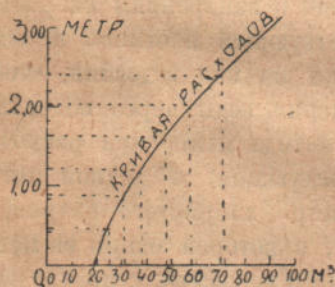
Так как расход меняется при изменениях высоты уровня, то для изучения реки требуется производить измерение расхода при разных

положениях уровня воды. Выше были объяснены затруднения, с которыми связано измерение скоростей течения с целью исчисления средней скорости для всего живого сечения, а, следовательно, и определения величины расхода. Поэтому приходится, по необходимости, ограничивать определение расхода воды непосредственными измерениями лишь для сравнительно небольшого числа разных положений высоты уровня воды, преимущественно для уровней более или менее устойчивых. Обычно только для немногих пунктов, где учреждены специально оборудованные и постоянно действующие *гидрометрические станции*, имеются измеренные расходы при многих положениях уровня, как обыкновенных, так и высоких. За неизменением измеренной величины расхода для данного уровня, расход воды может быть определен приблизительно по средней скорости течения, исчисленной по вышеприведенным в § 4-м эмпирическим формулам. Но и в сем случае для каждого положения уровня воды в реке требуется определить непосредственными измерениями величины площади живого сечения и гидравлического радиуса, а также поверхностного уклона.

Между тем, для практических целей встречается надобность знать, хотя бы с некоторым приближением к истинным, величины расходов при любых положениях высоты уровня воды в данном месте реки. Поэтому необходимо изыскать для данного места реки зависимость величины расхода от высоты уровня воды.

Если для данного места реки имеется достаточное число величин расхода, определенных измерениями скоростей при разных уровнях воды, то упомянутую зависимость выражают графически или эмпирическими формулами.

На чертеже 30-м показан подобный график расхода. На горизонтальной оси его откладывают, в произвольно принятом масштабе, величины расходов, а на вертикальной оси наносят высоты уровня воды, также в произвольно принятом масштабе. Относя к этим ординатам измеренные величины расходов, при соответствующих им уровнях воды, получается ряд точек, по которым может быть вычерчена плавная кривая, выражающая приблизительную зависимость между высотами и расходами воды в реке для данного ее места. Чтобы определить по такому графику искомую величину расхода при заданной высоте уровня воды в реке,



Черт. 30.]

нужно провести из соответствующей точки вертикальной оси горизонтальную прямую до пересечения с кривой, а из точки пересечения опустить перпендикуляр на горизонтальную ось, где и прочесть величину расхода по масштабу.

Если подыскать уравнение упомянутой кривой, принявши за переменные величины расход и высоту уровня воды, то такое уравнение будет служить для аналитического вычисления расхода при тех или иных положениях уровня воды. Зависимость между расходами и высотами воды неодинакова как для разных рек, так и для каждой реки в разных местах ее протяжения, причем большое в этом отношении значение имеет форма русла в поперечном его профиле. Поэтому, не представляется возможным выразить упомянутую зависимость какой либо одной общей для всей реки формулой. Изучая означенную зависимость для каждого данного места реки отдельно, ищут наиболее подходящий тип эмпирической формулы и определяют численные для нее коэффициенты.

Наиболее часто применяются следующие типы формул зависимости между расходом Q и глубиной воды t (в наиболее пониженной точке русла), или же между расходом Q и высотой h поверхности воды над нулем водомерной рейки ¹⁾:

$$Q = At^2$$

$$Q = Bt^{1,5}$$

$$Q = Ct^{2,5}$$

$$Q = a + bh + ch^2$$

$$Q = d(z + h)^n.$$

¹⁾ Принятие таких типов формулы для той или иной формы русла находит себе объяснение в следующих теоретических соображениях. Исходя из выражения для средней скорости течения $V = C \sqrt{RJ}$ и допуская, что для данного места реки уклон J и коэффициент C мало меняются при изменениях высоты уровня воды, имеем для расхода $Q = F \cdot V$ следующие выражения в зависимости от формы русла в поперечном сечении.

Для русла параболического. При ширине b (на поверхности воды) и наибольшей глубине t , по свойствам параболы $b = \alpha \sqrt{t}$ и $F = \frac{2}{3} \cdot bt = \frac{2}{3} \alpha t^{\frac{3}{2}}$. Гидравлический радиус R может быть заменен средней глубиной, которая при параболической форме русла равна $\frac{2}{3} t$.

Поэтому

$$V = C \sqrt{RJ} = C \sqrt{J} \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \cdot t}.$$

Следовательно,

$$Q = \frac{2}{3} \alpha \cdot C \sqrt{J} \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot t^{\frac{3}{2}} \cdot \sqrt{t}.$$

Называя произведение постоянных величин

$$\frac{2}{3} \alpha \cdot C \cdot \sqrt{J} \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} \text{ через } A,$$

$$\text{имеем } Q = At^2.$$

Так как в некоторых местах реки живое сечение иногда резко меняет свою форму при переходе от меженного русла к руслу высоких вод, то не всегда удается выразить зависимость между расходом воды и высотой уровня одним уравнением, а приходится иногда заменять его двумя уравнениями, из коих одно выражает зависимость только до определенной высоты уровня, а для уровней высших—служит другое уравнение ²⁾).

Так как высота уровня воды h отсчитывается обыкновенно от нуля водомерной рейки, то, полагая, что вершина параболы дна находится ниже нуля рейки на постоянную величину Z , можем принять, что $t = h + z$. Поэтому

$$Q = A(z + h)^2 = Ax^2 + 2Axh + Ah^2 = a + bh + ch^2.$$

Для русла прямоугольного по аналогичным основаниям, и полагая $R = t$,

$$Q = F \cdot V = bt \cdot C \sqrt{RJ} = b \cdot C \cdot \sqrt{J} t^{\frac{3}{2}} = Bt^{1.5}.$$

Для русла треугольной формы $Q = C \cdot t^{2.5}$.

2) Примеры формул расхода, определенных для некоторых рек.

Для реки *Днепра*, ниже города Екатеринослава, по данным измерений 19^{12/17} гг. Лодманско-Каменской гидрометрической станции, расход воды, в зависимости от высоты горизонта воды, считая от нуля Лодманско-Каменской водомерной рейки, выражается (в куб. саж.) следующими тремя формулами:

1) для горизонтов H от $-0,58$ саж. до $+0,50$ саж.

$$Q = 32,17 \cdot (1,661 + H)^{3,09},$$

2) для горизонтов H от $+0,50$ саж. до $+2,20$ саж.

$$Q = 187,19 (0,901 + H)^{1,865},$$

3) для горизонтов H от $+2,20$ саж. до $+2,87$ саж.

$$Q = 67,39 \cdot (1,70 + H)^{2,26}.$$

На реке *Волгове* около порогов, для времени, свободного от ледяного покрова, по данным позднейших исследований:

$$Q = 15,77 + 73,9 \cdot h + 66,56 \cdot h^2 \text{ (в саженах),}$$

где h возвышение уровня воды над отметкой $+7,0$ саж. над уровнем Балт. моря.

Для реки *Свири* около истока, по данным позднейших исследований:

$$1) Q = 338 - 15h + 875h^2 \text{ (в саженах),}$$

$$2) Q = 416,9 (0,64 + H)^{1,94} \text{ (в саженах),}$$

где формула 1-я более пригодна для низких горизонтов, а формула 2-я — для высоких горизонтов. В обеих формулах h и H есть возвышение горизонтов воды над условным нулем, который взят на отметке $+19,00$ саж. от уровня Балтийского моря.

Для реки *Гароны* около Лангонского моста (по Фаргу) при горизонтах до $+7,5$ метр.:

$$1) Q = 86,5 + 120,18h + 41,698h^2 \text{ (в метрах).}$$

При высоких же уровнях (свыше $+7,5$ метр.) более подходящей оказалась формула

$$Q = ch^{1.5}.$$

Для реки *Рейна* у Кельна, по исправленной формуле Гарляхера:

$$Q = 104,11 (h + 2,0)^{1,882} \text{ (в метрах).}$$

Для реки *Эльбы* у Артленбурга, по Тауберту:

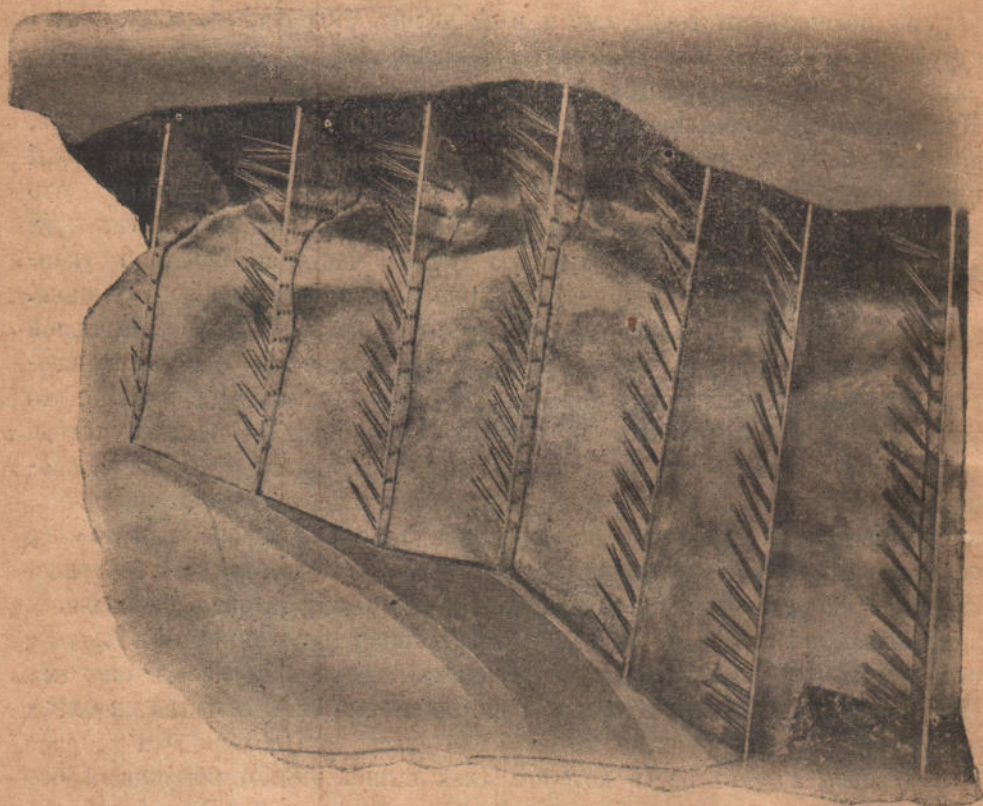
$$Q = 105,4 (h + 1,45)^{1,666} \text{ (в метрах),}$$

При определении расхода воды (равно как и средней скорости течения) нужно считаться с некоторыми обстоятельствами, могущими влиять на точность результатов в смысле соответствия действительной величине расхода воды в реке тех величин расхода, которые получены как помощью непосредственных измерений скоростей течения, так и пользуясь вышеуказанными формулами зависимости между расходом воды и положением уровня ее. К числу таких обстоятельств относятся, между прочим, следующие.

При определении вышеизложенными способами величин средних скоростей течения и расходов воды делается иногда допущение, что течение в реке происходит равномерно и параллельно струйно. В действительности речному течению свойственны разнообразные явления, нарушающие такую правильность. *Непараллельность* течения бывает как на поверхности воды, так и в ее толще. Большая параллельность струй между собою и с динамической осью потока свойственна каналам, а в реках — при потоке сжатом, с правильным и глубоким руслом. При широком, по сравнению с глубиной, и при неоднобразном русле, как это обыкновенно и бывает в реках, неправильности течения воды проявляются сильнее. Произведенные наблюдения показывают, что направления струй речного течения (направление наибольшей скорости движения частиц воды через данную точку) часто значительно уклоняются от направления, перпендикулярного к плоскости живого сечения. Отклонения эти наблюдались иногда до 50 и 70 градусов в горизонтальной плоскости и до 25 градусов в вертикальной плоскости. В обеих плоскостях струи оказывались сходящимися или расходящимися. Несомненно, что упомянутые явления влияют на точность определения величины расхода воды, если скорости течения измеряются вертушками, имеющими свободное движение своей оси в горизонтальном и вертикальном направлениях. Исчисление расходов по скоростям течения, измеренным такими вертушками, дает преувеличенную величину расхода, так как вертушка измеряет скорость течения в данной точке по направлению наибольшей величины скорости, а не по направлению, перпендикулярному к плоскости живого сечения, которое предполагается при исчислении расхода. По произведенным наблюдениям влияние этого обстоятельства на определяемую величину расхода может выразиться до 10%.

Прибор Гарляхера, в котором (как выше, в § 5, объяснено) ось вертушки закреплена в положении нормальном к плоскости живого сечения, — устраняет упомянутую неточность. Изучение главнейших направлений струй потока на поверхности реки может производиться помощью поплавков: пуская поплавки вниз по течению с разных точек по ширине реки и определяя засечками положение поплавков во время их свободного движения, можно на плане изобразить линии движения каждого поплавка, которые и дадут представление о направлениях поверхностных струй течения в исследуемом месте реки. Для изучения же

направления струй течения в разных по глубине и ширине точках живого сечения пользуются специальными приборами или особыми приемами гидрометрических наблюдений. С этой же целью был изобретен инженером Лелявским особый прибор—*струеизмеритель*, сущность которого состоит в том, что вертушка, измеряющая величину скорости течения в данной точке живого сечения и принимающая направление наибольшей скорости в той точке, находится в соединении с указателями вертикального и горизонтального лимбов, закрепленных к прибору выше поверхности воды. Такое устройство дает возможность читать угловые величины направления оси вертушки (а следовательно, и направление струй) по упомянутым лимбам, предварительно ориентированным относительно плоскости живого сечения реки.



Черт. 31. Струи речного потока.

Чертеж. 31-ый изображает фотографический снимок с находящейся в музее Института Инженеров Путей Сообщения модели участка реки Днепра на одном из его перекаатов. В виде игл на модели изображены направления струй и их скорости, измеренные помощью упомянутого прибора Лелявского.

Зимний расход воды в реке может весьма существенно разниться от расхода в летнее время при той же высоте уровня воды. Ледяной покров, проявляя на поверхности воды некоторую новую величину сопротивления движению воды, может влиять на уменьшение скоростей течения, а, следовательно, и на величину расхода. Образование в массе текущей воды ледяных игл, донный лед и пр. тоже могут ощутительно влиять на уменьшение скоростей течения и величины расхода воды. Образование подводных ледяных зажоров вызывает подпор поверхности воды, что может вводить в заблуждение относительно нормального, для данного расхода, положения уровня воды. В виду таких обстоятельств, не поддающихся сколько-нибудь точному учету, применение вышеуказанных формул зависимости между величиной расхода и высотой уровня воды, составленных на основании измерений расхода при состоянии реки, свободном от льда, может давать совершенно неверные результаты для зимних расходов воды. Как показали подробные исследования, произведенные в недавнее время на некоторых русских реках, расхождение величин расхода воды, измеренных в зимнее время, от величин расхода, измеренных в летнее время при тех же уровнях воды, достигало иногда весьма большой величины*). Поэтому в случаях, когда приходится считаться с зимними расходами, необходимо определять их специальными измерениями скоростей течения в зимнее время и, если на основании сих измерений окажется возможным, то подыскать особую, от летней, формулу зависимости между расходами и уровнями воды для зимнего времени. При современном стремлении во всех странах к широкому использованию силы падения воды в реках, помощью устройства гидроэлектрических силовых станций, вопрос о надлежащем изучении зимних расходов воды приобретает особо важное значение.

Неодинаковость величины расхода воды при одной и той же высоте ее уровня наблюдается в реке также во время паводков и половодья, именно в зависимости от того, находится ли уровень воды на данной высоте в период прибыли или убыли воды, когда поверхностные уклоны не одинаковы. Наковец, на точность измерения расхода воды могут влиять *пульсация* воды, образование *вихревых* течений, *водоворотов* и т. п. Явление пульсации выражается в неравномерности скорости течения в каждой данной точке, именно в попеременном ее увеличении и уменьшении. Изменения эти происходят в сравнительно тесных пределах, тем не менее при употреблении точных гидрометрических приборов пульсацию можно наблюдать. Она сильнее проявляется у дна,

*) На реке Волхове, по позднейшим измерениям расхода воды в летнее и зимнее время, расхождение величин расходов достигало больших пределов; так, например, при одинаковом положении уровня воды, на отметке 6,99 саж. от уровня Балтийского моря, летний расход составляет около 16 куб. саж. а зимний падал до 5 куб. саж. в 1 сек.

чем на поверхности воды, а также сильнее при малых скоростях течения, чем при больших.

Отношение между наибольшей и наименьшей величинами расхода бывает весьма неодинаково для разных рек и для разных мест каждой реки, так как оно зависит от разнообразных условий питания реки, о которых сказано в § 1. Господствует мнение, что отношение между расходами в половодие и в меженье время вообще увеличивается по мере истребления лесов и осушения болот, способствующих более равномерному стоку воды в годовой период времени. Выражаясь в десятках и сотнях упомянутое отношение обыкновенно менее значительно для рек больших и протекающих в равнинах, возрастает для малых рек и бывает наибольшим для горных рек *).

Подобно тому как при изучении колебаний уровня воды (§ 2), устанавливаются понятия о некоторых фактических и условных величинах расхода воды для данного места реки. К ним, например, относятся: фактические—самый большой и самый малый расходы вообще, возможный самый большой и самый малый расходы для каждого месяца или иной части года, или для того или иного состояния реки, как то: при ледоставе, при ледоходе, при паводках и т. п.; условные—средние для года или для каждого месяца и иной части года, средние при ледоходе и т. п.

Вычерчивая графики изменения расхода можно, подобно тому, как для колебаний уровня воды (§ 2), установить понятия об относительной повторяемости и длительности тех или иных величин расхода воды в данном месте реки.

*) На *р. Волге*, в разных местах ее протяжения, расходы меженье и при половодии выражаются в следующих цифрах:

	В межень	При высокой воде	Отношение
на участке ниже впадения <i>р. Шексны</i> около	33 к. с.	940 к. с.	1:30.
" " " " " <i>р. Оки</i> "	100 к. с.	2100 к. с.	1:21.
" " " " " <i>р. Камы</i> "	280 к. с.	4160 к. с.	1:15.

На *р. Днепре*, у *Екатеринослава*, при амплитуде колебаний горизонта воды в 3,45 саж., расход воды изменяется в пределах от 41 куб. саж. до 2090 куб. саж. (отношение 1:50).

На *р. Волхове* от 20 к. с. до 300 к. с. (отношение 1:15).

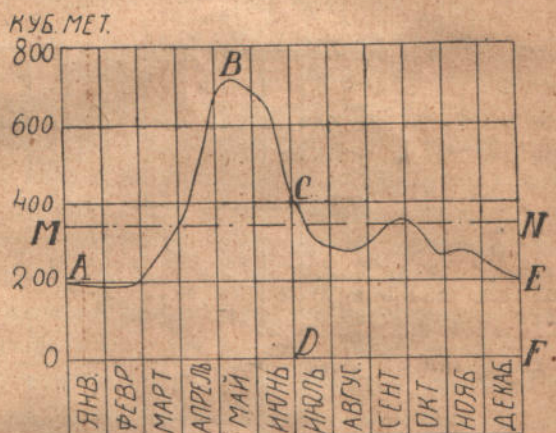
На реках западной Европы отношение между наименьшим и наибольшим расходом составляет:

для реки <i>Рейна</i>	$\frac{1}{12}$	у <i>Рейна</i>	$\frac{1}{16}$	у <i>Кельва</i>	$\frac{1}{19}$	у <i>Линца</i>
" " <i>Эльбы</i>	$\frac{1}{23}$	у <i>Артленбурга</i>	$\frac{1}{41}$	у <i>Магдебурга</i>	$\frac{1}{113}$	у <i>Мельника</i> .
" " <i>Мозель</i>	отношение расходов 1: 80					
" " <i>Некара</i>	" " 1:150					
" " <i>Рур</i>	" " 1:192					
" " <i>Гароны</i> (у г. Тулузы)	" " 1:167					
" " <i>Луары</i> (у <i>Бриара</i>)	" " 1:261.					

Для реки *Нила*, у *Каира*, отношение расходов 1:30.

Во многих случаях встречается надобность располагать данными о количестве воды, протекающей в данном месте реки за тот или иной период времени, о характере роста этого количества и т. п. С такими данными приходится иметь дело, например, при изучении вопросов, относящихся к устройству в реке водохранилищ, при изучении вопросов, относящихся к мощности гидроэлектрической станции, и др. Означенные данные о количестве протекающей воды получаются путем вычислений, пользуясь формулами или графиками расходов воды и колебаний уровня реки. Изображение результатов исчислений в виде соответствующих графиков значительно облегчает пользование такими данными.

На чертеже 32-ом показан график колебаний величины секундного расхода воды для данного места реки в течение годового периода времени (годовая кривая секундного расхода). На оси абсцисс OF , в произвольно принятом масштабе, откладывается время, считаемое по числу дней (если имеются данные о среднем положении горизонта воды для каждого дня). На ординатах, соответствующих каждому дню, откладывается, тоже в произвольно принятом масштабе, величина секундного расхода воды, соответствующая положению горизонта воды в этот день.



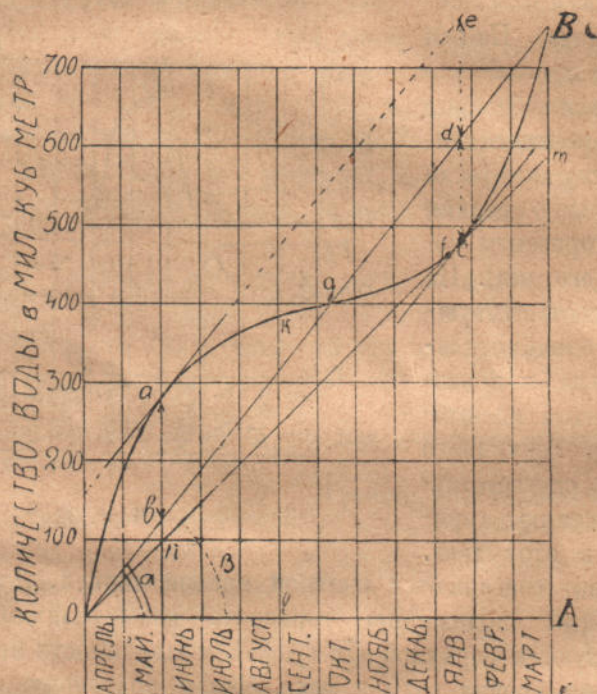
Черт. 32.

Концы ординат соединяются плавной кривой линией. Для определения соответствующей положению горизонта воды величины секундного расхода пользуются формулой или графиком зависимости между расходами и положениями уровня воды в реке. Чтобы по такому графику определить количество воды, протекавшей в течение какого-либо периода года, достаточно измерить планиметром или исчислить иным приближенным способом площадь фигуры, заключенной между кривой, осью абсцисс и двумя ординатами, граничащими начало и конец рассматриваемого периода времени. Полученную величину площади нужно помножить на число секунд, заключающихся в одном дне (86.400). Так, например, если по графику, изображенному на чертеже 32-ом, где месяцы отложены в масштабе по числу дней, желательнее определить количество воды (в куб. метр), протекавшее с 1 января по 1 июля, то нужно измерить величину площади $OABCD$ и помножить ее на 86.400.

Чтобы по тому же графику определить величину среднего за весь год секундного расхода, достаточно на прямой oF построить прямоугольник $OMNF$, равновеликий площади $OABCEF$, причем высота прямоугольника OM даст искомую величину среднего секундного расхода.

Если на горизонтальной оси нанесено время, считаемое не днями, а неделями или иными периодами, то по графику колебаний уровня воды (см. § 2) предварительно определяют среднюю высоту уровня воды за каждую неделю, причем откладываемая величина секундного расхода исчисляется для этого среднего за неделю положения уровня, а измерения величины площади помножаются на число секунд, заключающихся в одной неделе.

На чертеже 33-ом изображен график так наз. интегральной кривой расхода воды. На оси абсцисс откладывается время так же, как и на только-



Черт. 33. Интегральная кривая расхода.

что объясненом графике расходов. На ординатах же откладывается, в произвольно принятом масштабе, весь объем воды, протекшей в реке от момента, с которого начато построение графика*), до момента, которому соответствует данная ордината. Так, например, на ординате KI отложено количество

*) При манипулировании с гидрологическими данными представляется более удобным рассматривать годовой период не календарный, а считая его с начала весны одного года и до начала весны следующего года или с конца осени до конца осени следующего года.

кубических метров воды, протекшее за все время с 1-го апреля по 1 сентября, на ординате AB —количество кубических метров воды, протекшее за весь год. Чтобы найти по этому графику количество воды, протекшее за какой-либо промежуточный в году период времени, достаточно взять по масштабу разность высот ординат, граничащих концом и началом сего периода. Если бы все количество воды, прошедшее по реке в течение целого года, текло равномерно, т. е. с одинаковой величиной секундного расхода, то кривая линия обратилась бы в прямую OB . Величина среднего за год секундного расхода $\theta = \frac{AB}{OA} = \text{тыс.}$ Чтобы найти те моменты в году, когда вода текла с этим средним (за год) секундным расходом, достаточно провести параллельные с прямой OB касательные к выпуклостям кривой линии, причем точки касания a и c укажут искомые моменты. В те периоды времени, для которых касательные к кривой составят с осью абсцисс углы большие угла α , секунднй расход был более среднего. Если бы для обеспечения в течение всего года секундного расхода воды, не меньшего, например, среднего за год расхода, можно было располагать запасным водохранилищем, из которого выпускать в реку дополнительные количества воды, когда естественный секунднй расход менее среднего, то по графику легко определить нужный объем водохранилища. Действительно, объем воды ab равен тому объему, который пришлось бы израсходовать из водохранилища в течение промежутка времени, соответствующего проекции (на ось абсцисс) кривой ag ; объем же воды cd понадобился бы на дополнительное питание реки из водохранилища в течение времени, соответствующего проекции кривой gc . Общий нужный объем водохранилищ составил бы объем $ce = ab + dc$. Прямая om , приведенная касательно к нижней выпуклости кривой (в точке f) даст с осью абсцисс угол β , причем $\text{тыс.} \frac{Am}{OA}$ укажет величину секундного расхода, который может быть на весь год обеспечен объемом воды an в водохранилище.

Графики, показанные на черт. 32 и 33, обыкновенно составляются для периода времени, охватывающего несколько лет, дабы учесть значение не одинаковых условий питания реки в разные годы.

Если путем вычислений определить все то количество воды, которое протекает через данное поперечное сечение реки в течение многолетнего периода времени, и из этого количества вывести средний расход в секунду, то величина такого расхода называется *модулем* реки в данном ее сечении. Модуль в устье реки характеризует *водоносность* реки.

По длине реки, в направлении течения, расход воды вообще возрастает, причем он резко увеличивается в местах слияния с крупными притоками и достигает своего максимума около устья. Впрочем, бывают в этом отношении некоторые исключительные особенности рек. Следует иметь в виду, что на величину расхода воды, кроме условий питания

реки, влияют также и свойства грунта ее ложа. При водопроницаемом грунте часть воды просачивается в почву и эта вода, находясь в ложе реки, движется в направлении наименьшего сопротивления, которое чаще совпадает с направлением течения самой реки, но может находить себе и иные направления. При особо благоприятных условиях для проникновения речной воды в почву, например, при мощных гравелистых слоях, впитывание иногда бывает так сильно, что река на некотором протяжении совершенно обнажает свое русло и видимого течения не происходит. Равным образом имеются примеры постепенного по длине реки уменьшения расхода вследствие разбора воды каналами для искусственного орошения земель; некоторые же реки и вовсе теряются в песчаных степях.

§ 7. Наносы и их движение.

Вода атмосферных осадков, стекая в реку по склонам гор, долин и оврагов, смывает с поверхности земли частицы грунта и уносит их в русло реки. Вода, текущая в реке, встречает на своем пути грунты не одинакового качества, в большей или меньшей степени подверженные размыву. Под действием силы текущей воды, также не одинаковой в разное время и в разных местах как по длине, так и по ширине реки, происходит размыв русла и берегов в тех местах, где грунт не может сопротивляться действующему на него течению. Размывая грунт и перенося продукты размыва река отлагает их в других местах своего русла, где условия течения тому благоприятствуют. Притоки реки тоже несут в нее наносы, которые складываются в реке частью вблизи впадения притока, частью даже ниже по течению.

Вследствие этого речное русло состоит, обыкновенно, из наносных отложений более или менее значительной толщины. Оно не остается в покое. Под влиянием живой силы текущей воды, зависящей от меняющихся величин массы воды и скорости ее движения, частицы русла то отрываются от ложа и несутся вниз по течению, то складываются с тем, чтобы при новом увеличении этой силы вновь переноситься далее. При этом крупные частицы постепенно от трения и ударов раздробляются в мелкие, становящиеся все более и более чувствительными к движущей силе речного течения. Пройдя длинный путь по реке измельченные наносы выносятся в море и там откладываются, наращивая дно и берега, или увлекаются далее морскими волнами и течениями. Эта непрерывная колоссальная работа реки находит свое отражение в постоянных деформациях речного русла. В одних местах происходит разработка русла в глубину или ширину, в других оно наращивается и таким образом меняется его конфигурация.

Движение наносов. В зависимости от крупности частиц и величин скоростей течения, движение наносов происходит различным образом: перемещаемые частицы или скользят и катятся по дну, или

несутся во взвешенном состоянии в воде речного потока. На неглубоких реках, в особенности на горных с гравелистым дном, при прозрачной воде можно видеть, как гравий перемещается на дне по направлению течения, причем увлекаются течением камни даже значительных размеров. Равным образом на каждой реке можно наблюдать, что ее вода не одинаково мутна в разное время и что мутность эта зависит от присутствия в воде частиц грунта в большем или меньшем количестве. Частицы эти, в большинстве случаев, имеют удельный вес, больший единицы, а потому они не могли бы всплывать со дна и держаться в воде, если бы вода находилась в спокойном состоянии. Это обстоятельство указывает, что текущей воде присущи некоторые свойства, благодаря которым она способна нести в себе тела большей плотности, чем плотность воды. Наблюдения показывают, что количество частиц, передвигающихся по дну и в воде, увеличивается с увеличением расхода воды и скоростей течения, что по дну передвигаются более крупные частицы, чем несущиеся в воде, что, из последних, мельчайшие частицы поднимаются более энергично к поверхности воды, а более тяжелые частицы держатся ближе ко дну, что при постоянстве величины расхода воды в реке и скоростей ее течения густота насыщения воды частицами, достигнувши некоторого предела, более не увеличивается, и что по мере уменьшения скоростей течения воды частицы опускаются на дно, начиная с более крупных, и в том же порядке зерна располагаются по высоте в наносных отложениях.

По отношению передвижения по дну реки частиц, отдельно лежащих на дне, теоретические исследования показывают, что вес частиц, передвигаемых течением, как при скольжении, так и при катании, пропорционален шестой степени скорости течения, на них давящего.

Действительно: если частицы имеют форму куба и если a есть длина стороны наибольшего куба, который может передвигать течение, имеющее скорость V , то, при удельном весе γ материала, из которого состоят частицы,

$$\text{сила трения частицы на дне реки} = f (\gamma - 1) a^3$$

$$\text{полное давление течения на поверхность куба} = Ka^2 V^2$$

где f — коэффициент трения,

а K тоже постоянный коэффициент.

$$\text{Для равновесия необходимо: } f (\gamma - 1) a^3 = Ka^2 V^2.$$

$$\text{Откуда } a = \frac{K}{f (\gamma - 1)} \cdot V^2.$$

Следовательно, вес наибольшего куба, который может двигать течение, обладающее скоростью по дну V_0 ,

$$P = (\gamma - 1) \cdot a^3 = \frac{K^3}{f^3 (\gamma - 1)^2} V_0^6$$

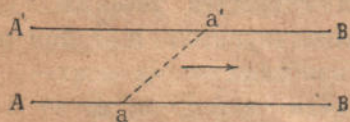
Если P_1 и P_2 будут веса кубов, которые только что могут быть передвигаемы течением, обладающим соответственными скоростями по дну v_1 и v_2 , то между ними имеется пропорциональность

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{v_1^3}{v_2^3}$$

Можно доказать, что такая же пропорциональность сохраняется и при другой форме частиц, а также не только при скольжении, но и при катании частицы по дну реки.

Причины и условия движения в речном потоке твердых частиц во взвешенном состоянии до настоящего времени еще недостаточно установлены. Изучением этих вопросов занимались многие гидравлики.

Первое научное объяснение разнообразных явлений, которые наблюдаются при таком движении, дал Dupuit в половине минувшего века. Он указывал, что максимальное количество взвешенных частиц располагается не в той части живого сечения реки, которая обладает наибольшими абсолютными величинами скоростей течения, а находится в нижних слоях речной воды и соответствует наибольшей относительной скорости соседних частиц воды. Наблюдением плавающих тел можно убедиться (черт. 34), что тело a , свободно плавающее на поверхности



Черт. 34.

реки, движется вниз по течению со скоростью, превышающей скорость течения в данном месте реки, и вместе с тем оно стремится перемещаться от берегов к стрежню реки, т. е. к месту больших скоростей течения, совершая косой путь $a-a_1$. Это явление послужило выводам

Dupuit, что, вследствие разности относительных скоростей, тело подвергается действию некоторой силы, направленной поперек реки от меньших к большим абсолютным скоростям течения, при чем сила эта тем больше, чем больше разность скоростей смежных струй воды. Применяя выведенный закон, по аналогии, и к скоростям, рассматриваемым в вертикальном сечении, параллельном течению, он находит, что проявляется сила, направленная вверх, которая и производит явление взвешивания. Как указано в § 4, скорости течения в реке уменьшаются в глубину, причем кривая изменения величины скоростей становится по мере приближения ко дну все более крутой, т. е. разность скоростей смежных струй уменьшается, по вертикали, по мере удаления от дна реки, а, следовательно, уменьшается и подъемная сила. Силе этой сопротивляется вес тела. Поэтому твердая частица может подняться только до некоторой высоты, где при данных скоростях течения наступает равновесие между подъемной силой и силой веса. С изменением относительной величины скоростей, частица станет соответственно подниматься в верхние слои воды или опускаться в нижние. Если рассма-

тривать отношение некоторого взвешенного тела к другим соседним, то присутствие другого тела способствует уменьшению относительной скорости струй, а потому оба тела будут вынуждены опускаться в нижележащие слои. Опускание и подъем твердых тел будет следовать в зависимости от того, будут ли тела приближаться одно к другому или взаимно удалаться.

Выводы своей теории Dupuit формулирует в следующие положения:

1) В текущей воде могут находиться во взвешенном состоянии твердые тела, обладающие плотностью, превышающей плотность воды.

2) Сила взвешивания зависит от относительной скорости струй и она тем больше, чем больше относительная скорость. Вообще она пропорциональна величине $\frac{dv}{dz}$, где v — скорость потока, а z — глубина (считая от поверхности), так что нижние слои могут нести твердые тела или в большем количестве, или такие же тела большего объема.

3) Сила взвешивания для данного состояния реки ограничена, т. е. 1 кв. метр живого сечения реки может нести только известное количество твердых тел определенного объема. Таким образом каждый слой воды имеет различную степень насыщения.

Если живое сечение реки изменяется, то, согласно приведенных положений, изменится сила взвешивания, так как с изменением живого сечения произойдет изменение и вида кривой скоростей. Если сила взвешивания уменьшится, то последует некоторое отложение наносов на дно, а если она увеличится, то произойдет подъем некоторых частиц со дна, т. е. размыв. Dupuit поясняет, что эти результаты находятся в зависимости не только от изменения живого сечения в данном месте реки, но также и от вышележащей части реки, которая обуславливает степень насыщения, с каковой вода достигает рассматриваемого живого сечения. Если наступает отложение наносов, то они берутся целиком из нижних слоев течения, получающих, в свою очередь, из верхних слоев тот излишек наносов, который не в состоянии более поддерживаться там во взвешенном состоянии. Этим объясняется стоечное строение речного русла, состоящего из материалов, размер которых увеличивается вглубь от поверхности дна.

Теория Dupuit объясняет многие явления при движении речных наносов. Нужно, однако, заметить, что она основывается на предположении параллелоструйного течения воды в реке. Результатами дальнейших изучений свойств речного течения такое допущение отвергается, равно как оспариваются и некоторые другие положения в теории Dupuit.

Некоторые исследователи видят причины движения твердых частиц во взвешенном состоянии именно в явлениях непараллелоструйности речного течения. Движения частиц наносов во взвешенном состоянии на ряду с передвижением по дну они объясняют тем обстоя-

тельством, что вода, вследствие существования в реке течений, направленных по косому направлению снизу вверх, поднимает твердые частицы или препятствует им опуститься на дно.

Инженер Н. С. Лелявский, занимавшийся специально изучением направлений струй в речном потоке, характеризует в своей теории движения наносов особые два вида этих направлений. При известных условиях, в некоторых местах реки текущая вода принимает вид клинообразно сходящихся струй, направленных с поверхности наклонно вниз ко дну („сбойное течение“), в другом месте струи, напротив, как бы расходятся веерообразно. В первом случае сосредоточивается живая сила текущей воды и производит размыв русла, в другом месте — расхождение струй способствует отложению наносов.

Сложность условий движения наносов усугубляется еще тем обстоятельством, что твердые частицы, из которых состоит дно реки, находятся во взаимодействии друг с другом.

Основные определения, которыми иногда пользуются при разрешении некоторых вопросов, касающихся движения и складывания наносов, даны инженером *Du-Boys* в его теории формирования речного русла, основанной на изучении реки Роны.

По его теории, процесс движения и складывания наносов является результатом взаимодействия: а) силы влечения частиц грунта, которая проявляется текущей водой, и б) силы сопротивления, оказываемого частицами грунта силе влечения их водой. Нарушение равновесия этих сил в ту или другую сторону выявляется или смытием и влечением наносов, или откладыванием их на дне реки там, где сила сопротивления превышает силу влечения.

Согласно выводов *Du-Boys*, сила влечения прямо пропорциональна глубине потока и величине поверхностного уклона, причем для площади дна, равной одному квадратному метру, она выражается

$$S = 1000 \ H i$$

где S — сила влечения, выраженная в килограммах, H — глубина воды на данном месте в метрах, а i — численная величина уклона поверхности воды.

Объемное количество наносов, которое может смываться и передвигаться по дну на одном метре ширины русла при данной силе влечения S , определяется выражением

$$q = E \cdot S (S - S_0),$$

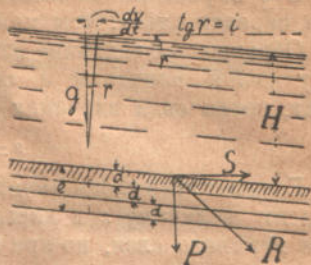
где q — количество наносов в куб. метрах, передвигающихся в одну секунду, S_0 — сила влечения только что достаточная для начала движения наносов, а E — численный коэффициент, постоянный для качеств грунта в данном месте реки.

Теоретические выводы Du-Boys заключаются в следующем.

Для простоты рассуждений примем, что на некотором протяжении реки ее течение равномерное установившееся, что поверхность воды представляет плоскость, наклонную к горизонту под углом γ (черт. 35), причем назовем уклон ($\tan \gamma$) через i ; дно предполагается параллельным поверхности воды, при глубине H .

Выделим из текущей воды призму, площадь основания которой равна 1 кв. метр., а высота $= H$.

Если бы не имелось никакого сопротивления движению этой призмы в ее основании, то, благодаря уклону, она под влиянием постоянной силы двигалась бы с возрастающей скоростью, причем через элементарный промежуток времени dt , движущаяся масса воды получала бы приращение живой силы:



Черт. 35.

$$m \frac{(v + dv)^2}{2} - \frac{mv^2}{2} = mvdv,$$

где m — масса взятой призмы воды, а v — начальная скорость.

Но так как, по условленному, течение установившееся равномерное, то, следовательно, приращение живой силы поглощается работой на преодоление сопротивления. Эта работа и сила влечения определяются из следующего.

Ускорение $\frac{dv}{dt} = gi$; пройденный путь $= vdt$; работа, затраченная на этом пути для преодоления сопротивления, равна $m \cdot gi \cdot vdt$, а сила, производящая работу, $= mgi$.

А так как масса $m = \frac{1000 \cdot H}{g}$,

то сила влечения (в килогр. на кв. мет.):

$$S = \frac{1000 \cdot H}{g} \cdot gi = 1000 H \cdot i \dots \dots \dots (1)$$

Если на 1 кв. метре поверхности дна помещается (в одном слое) N зерен пшеницы, объемом каждый $= K$, и если удельный вес их $= \delta$, то вертикальное от них давление (вес в воде):

$$P = 1000 \cdot (\delta - 1) N \cdot K.$$

Направление равнодействующей сил S и P

$$\tan w = \frac{S}{P} = \frac{1000 H i}{1000 (\delta - 1) N K} = \frac{H i}{(\delta - 1) N K}$$

Каждому роду грунта соответствует определенный угол трения α . Если $\alpha < w$, то начинается движение. Следовательно, условие, при котором будет происходить сдвигение слоя грунта, определяется выражением

$$\tan \alpha < \tan w$$

или

$$\tan \alpha < \frac{S}{1000 \cdot (\delta - 1) \cdot N K},$$

откуда

$$N K < \frac{S}{1000 (\delta - 1) \tan \alpha}.$$

Величина N K есть объем некоторого слоя наноса, средняя толщина которого равна e ; следовательно вообще толщина движущегося слоя:

$$e \leq \frac{S}{1000 (\delta-1) \text{ tga}} \dots \dots \dots (2).$$

Это выражение показывает, что нанос определенного грунта будет тем легче передвигаться, чем меньше средняя толщина слоя наноса.

Обращаясь к величине наносных передвижений, заметим, что равновесие между силой влечения и сопротивлением слоя наносов, толщиной d , наступит, когда сила влечения достигнет величины:

$$s = d \cdot 1000 (\delta-1) \text{ tga}.$$

Если под этим слоем имеется еще слой наноса, то, как только сила влечения превысит величину s и достигнет некоторой величины S , начнется движение верхнего слоя, но при этом скорость движения будет замедляться тою силою сопротивления, которую окажет нижележащий слой.

Сила влечения, которая будет передаваться от вышележащего слоя к нижележащему,

$$S - s = 1000 H_i - d \cdot 1000 (\delta-1) \text{ tga} = 1000 [H_i - d (\delta-1) \text{ tga}].$$

Если этот избыток силы влечения будет на столько велик, что превысит сопротивление и второго снизу слоя, толщиной d_1 , то оба слоя будут находиться в движении, причем проявится движущая сила и на третий снизу слой, а именно сила, равная $1000 [H_i - (d + d_1) (\delta-1) \text{ tga}]$.

Таким образом, по мере роста влекущей силы воды, станут приходить в движение новые и новые слои, а общая толщина движущихся слоев $e = d + d_1 + d_2 + \dots = \Sigma d$ всегда будет соответствовать величине движущей силе S , определяющейся из выражения:

$$e = \Sigma d = \frac{S}{1000 (\delta-1) \text{ tga}} = \frac{1000 H_i}{1000 (\delta-1) \text{ tga}} = \frac{H_i}{(\delta-1) \text{ tga}}.$$

При таком движении наносов (слоя по слою) можно принять, что в однородном грунте, а следовательно при одинаковости сопротивления, оказываемого каждым слоем, — относительная между смежными слоями скорость движения будет одинакова по всей толщине движущегося наноса, и, если принять, что скорость движения 1-ого снизу слоя $= 0$, а 2-ого слоя по 1-ому $= v$, то 3-ий слой будет иметь абсолютную скорость движения $= 2 v$; абсолютная скорость 4-ого слоя $= 3 v$ и т. д., а n -ого слоя — абсолютная скорость $= (n-1) v$.

Следовательно общее количество q движущегося наноса на ширине полосы дна, равной 1 метру, при толщине отдельных слоев равной d и общей их толщине $e = nd = \frac{S}{1000 (\delta-1) \text{ tga}}$, будет

$$q = d \cdot v + d \cdot 2v + d \cdot 3v + \dots + d \cdot (n-1) v = d \cdot n \cdot \frac{n-1}{2} v = e \cdot \frac{n-1}{2} v.$$

Если сила влечения будет не S , а S_1 , то действие ее распространится на n_1 слоев, т. е. на толщину грунта $e_1 = n_1 \cdot d = \frac{S_1}{1000 (\delta-1) \text{ tga}}$, а количество приносимого грунта составит:

$$q_1 = e_1 \cdot \frac{n_1-1}{2} v.$$

следовательно

$$\frac{q}{q_1} = \frac{e}{e_1} \cdot \frac{n-1}{n_1-1},$$

откуда

$$q = q_1 \cdot \frac{e}{e_1} \cdot \frac{n-1}{n_1-1}$$

Называя через S_0 ту величину силы влечения, при которой только что может начаться движение наноса, или, иначе говоря, которая способна сдвигать только один слой $d = \frac{S_0}{1000 (\delta-1) \text{ тга}}$, и замечая, что глубины в грунте, на которые простирает свое действие сила влечения, пропорциональны величинам этих сил, т. е. что

$$\frac{e}{e_1} = \frac{n \cdot d}{n_1 \cdot d} = \frac{S}{S_1} \dots \dots \dots (3)$$

имеем:

$$nd - d = \frac{S}{1000 (\delta-1) \text{ тга}} - \frac{S_0}{1000 (\delta-1) \text{ тга}},$$

или

$$(n-1) d = \frac{S-S_0}{1000 (\delta-1) \text{ тга}},$$

также

$$(n_1-1) d = \frac{S_1-S_0}{1000 (\delta-1) \text{ тга}},$$

откуда

$$\frac{n-1}{n_1-1} = \frac{S-S_0}{S_1-S_0},$$

а потому

$$q = q_1 \cdot \frac{e}{e_1} \cdot \frac{n-1}{n_1-1} = q_1 \cdot \frac{S}{S_1} \cdot \frac{S-S_0}{S_1-S_0} = q_2 \cdot \frac{S}{S_2} \cdot \frac{S-S_0}{S_2-S_0} = \text{и т. д.}$$

или отношение

$$\frac{q}{S(S-S_0)} = \frac{q_1}{S_1(S_1-S_0)} = \frac{q_2}{S_2(S_2-S_0)} = E \dots \dots \dots (4)$$

и, следовательно, вообще

$$q = E \cdot S(S-S_0) \dots \dots \dots (5)$$

Величину E , как постоянную для определенного грунта, можно назвать *коэффициентом расхода наносов* для данного рода грунта.

Приведенные рассуждения и выведенные формулы относились только к части ширины живого сечения реки, именно к одному метру ширины, взятому в каком-либо месте сего сечения. Чтобы перейти к более значительной ширине или ко всей ширине живого сечения реки, нужно произвести соответствующие суммирования, имея при этом в виду, что для разных точек по ширине реки глубина H является величиной переменной.

Нужно заметить, что если H_0 есть та глубина, при которой только что может начаться движение наноса, то соответствующая в этом месте величина силы влечения $S_0 = 1000 H_0 i$ (см. ур. 1).

Производя суммирование, получаем (черт. 36):

Полная для всего живого сечения сила влечения, согласно уравнения (1),

$$\Sigma S = \Sigma 1000 \cdot i \cdot H = 1000 i \int_{x=0}^{x=b} H dx$$

а так как $\int_{x=0}^{x=b} H dx$ есть площадь живого сечения F , то

$$\Sigma S = 1000 \cdot i \cdot F \dots \dots \dots (6)$$

Полное для всего живого сечения количество влекомых наносов, которое можно назвать *расходом наносов*, будет, согласно уравнения (5),

$$\theta = \int_{x=0}^{x=b} q \, dx = E \int_{x=0}^{x=b} S (S - S_0) \, dx$$

где $S = 1000 \, H_i$, а $S_0 = 1000 \, H_0 i$.

Следовательно,

$$\theta = E (1000 \, i)^2 \int_{x=0}^{x=b} H (H - H_0) \, dx \quad (7)$$

Причем суммирование должно быть распространено лишь на ту часть живого сечения (b_0), где глубина H больше глубины H_0 , с которой только и начинается влечение наносов.

В формулу (7) входит постоянная величина E —коэффициента расхода наносов. Определение этой величины могло бы быть сделано или в натуре

на опытном участке реки, или лабораторно в искусственном русле гидротехнической лаборатории. Однако, тот и другой способ встречают значительные затруднения, так как в натуре трудно измерить с достаточной точностью количество проносимого наноса при данном состоянии реки, а при лабораторном способе для возможности соблюсти принцип подобия требовалась бы модель большой величины, а кроме того явились



Черт. 36.

бы затруднения и в отношении выбора песка для лабораторных опытов. Практически во многих случаях можно избежать определения величины коэффициента E ; например, при проектировании нормального профиля выправляемого русла реки, который обыкновенно избирают соответственно естественных условий на хороших участках той же реки, метод расчета позволяет исключить неизвестную величину E .

Приведенными выражениями пользуются иногда и для практических целей, например при проектировании каналов, имеющих свободное течение, при определении нормальных профилей для регулируемого русла реки и пр.

Имеются и другие теории движения наносов, облеченные в математические выводы. Но, вообще, по отношению таких теорий следует иметь в виду, что явления движения и складывания наносов в реках чрезвычайно сложны и разнообразны, как сложны и разнообразны свойства речного русла и течения при разных состояниях реки и при разных грунтовых условиях, с которыми в тесной связи и находятся явления наносов. Поэтому при разрешении конкретных технических задач, касающихся вопросов о движении и складывании наносов в данной реке, следует с большой осторожностью обращаться к той или иной теории и пользоваться ее выводами. Главным основанием для правильного решения подобных задач является тщательное непосредственное изучение естественного быта данной реки во всех его проявлениях.

§ 8. Речное русло и берега.

Формы и свойства речного русла. Руслом реки принято называть ту часть долины, которая составляет ложе текущей воды при обыкновенном состоянии реки. Берега этого русла обыкновенно лишь немного возвышаются над положением среднего уровня воды в реке и заливаются в период половодья на большую или меньшую ширину долины, в зависимости от топографических условий последней. Иногда, впрочем, наименование русла распространяют и на ту часть долины реки, которая занимается ею во время половодья, причем в этом случае необходимо различать два понятия: *русло межених вод* (меженнее русло) и *русло высоких вод* (весеннее русло или русло половодья). Различие между ними весьма существенно. Первое составляет только часть второго; оно находится всегда под водою; деформирующие факторы действуют на него непрерывно, а потому меженнее русло подвергается постоянным изменениям, более или менее значительным. В период высоких вод требуется большая площадь живого сечения. Если меженнее русло заключено между высокими берегами, то на время половодья русло реки увеличивается лишь за счет затопляемых откосов берега на большую или меньшую ширину, в зависимости от крутизны откосов. Но если река течет в низкой равнине, то при высоком горизонте она выходит из берегов и затопляет прибрежные местности, причем такие разливы в некоторых местностях простираются в ширину иногда на десятки верст. Однако, главные течения происходят все же над меженным руслом и только по тем местам разлива, где вода находит себе сток по направлениям, более или менее совпадающим с общим направлением реки. При этом или образуются рукава реки между незатопленными площадями местности, или, на ряду с затопленными местами, где течение воды сохраняется, образуются площади стоячей воды (*поймы*). После спада высоких вод земля обнажается и покрывается густой травой; временное затопление не препятствует росту на разливах кустарников и даже деревьев. Всякого же рода растительность способствует укреплению почвы в отношении сопротивления ее размывам. В силу приведенных обстоятельств половодие также оказывает наибольшее влияние на меженнее русло; в других же частях затопляемых местностей в период половодья происходят обыкновенно менее значительные размывы или наносы, преимущественно по направлениям главных течений на разливах. Впрочем, в некоторых случаях размывы и наносы по этим направлениям могут быть настолько сильны, что разрабатываются новые рукава, причем образуются острова. Старые рукава иногда закрываются, обращаясь в так называемое *староречье*, причем река покидает свое прежнее меженнее русло, переведя его на другое место долины.

В дальнейшем изложении под наименованием речное русло разумеется ложе воды при обыкновенном состоянии реки.

Общий характер речного русла зависит главным образом от геологических и топографических условий местности. В этом отношении резко отличаются между собою горные участки рек от участков, расположенных в низких равнинах. В больших реках, берущих начало в горах и впадающих в море, горные участки соответствуют обыкновенно только верхнему течению реки, а равнинные — нижнему течению. Средняя часть реки занимает, по характеру русла, промежуточное положение между упомянутыми частями, приближаясь по некоторым свойствам к той или другой и составляя как бы постепенный переход в их характерных свойствах.

Медленно разрушая твердые горные породы вода, стекающая в горных верховьях реки, обладает большими скоростями течения; она несет крупные частицы горных пород в виде камней, гальки и гравия, из которых и составляется здесь ложе реки на большую толщину. Постепенно передвигая такие частицы и на пути измельчая их, а также обогащаясь более мелкими продуктами размывов в средней части своего течения и выносами из притоков тоже измельченных ими частиц, река несет в свои низовья только мельчайшие частицы, где образуются мелко песчаные, а также илистые наносные отложения. Из таких же легко размываемых грунтов состоят здесь и нижние слои, образовавшиеся из древних наносных отложений в долине реки. Поэтому самый состав почвы русла реки меняется постепенно по мере приближения от верховья реки к ее устью. Вместе с тем меняется сопротивляемость размыву берегов русла как меженного, так и высоких вод, так как грунты переходят от скалистых, в горах, к более мягким на остальном протяжении реки, где выходы скалы встречаются сравнительно редко.

Также видоизменяется и характер речной долины: после горных ущелий и глубоких тальвегов холмистой местности, долина все более расширяется в среднем течении реки, переходя к низовьям в равнину со слабыми, иногда едва уловимыми склонами к реке.

Соответственно изменяются и свойства водного потока в реке. Поверхностные уклоны и скорости течения, как выше уже сказано, обыкновенно уменьшаются по протяжении реки. Паводки в горных и холмистых верховьях реки носят бурный характер, они чаще происходят и менее регулярны в смысле периодичности их наступления. Но мощность речного потока постепенно, по длине реки, обогащается массами воды, которые требуют себе все более широкого и глубокого русла.

Совокупностью приведенных условий объясняются характерные формы русла рек на тех или иных участках. Следует заметить, что многие реки Европейской России берут свое начало на плоских возвышенностях из болотистых местностей, и таким рекам чужды те свойства, которые присущи горным участкам рек.

В горных участках реки очертание русла в плане зависит, главным образом, от рельефа тальвега, в котором оно расположено. Чем тальвег менее развит, тем неправильнее русло реки. Следуя изгибам тальвега, русло, в плане, то вытягивается по прямой линии, то часто и круто меняет свои направления, обращая их в зигзаго-образный вид. Следуя формам тальвега и встречая програды река, то разливается в ширину, образуя как бы озера с очень слабым продольным уклоном, то суживается между близко сходящимися крутыми берегами и обращается в стремнины (быстротоки).

Если речная долина спускается скалистыми терасами, или если речной поток пробивается через твердую преграду, которую он не способен размыть в пологий склон, то иногда на таких местах вода падает свободно с некоторой высоты. Такие места называются *водопадами*. Замечательным примером речного водопада является

Ниагарский водопад в Северной Америке на реке Ниагаре, соединяющей озера Ири и Онтарио (рис. 37). Здесь река, разделившись перед водопадом на два рукава, падает двумя огромными каскадами вышиной около 23 саж. и шириною один в 286, а другой 175 сажен. Наибольшей известностью пользуется в Западной Европе Рейнский водопад у Шафгаузена с высотой падения около 12 сажен; у нас в России водопад Кивач, высотой до 5 сажен на реке Суне в Олонецкой губернии, а в Финляндии водопад Иматра на реке Ву-



Черт. 37. Ниагарский водопад.

оксе; в последнем, однако, вода падает не вертикально, а по крутому уступу, как бы в лотке, причем падение реки в $7\frac{1}{2}$ сажен сосредоточено на протяжении 150 сажен.

Особый вид принимает русло горной реки, если она не стеснена узким и глубоким тальвегом, а может свободно развиваться по широкой полосе, состоящей из мощных слоев гальки и крупного гравия. Видимый поток прокладывает себе путь по многочисленным переплетенным между собою рукавам и протокам, между которыми образуются невысокие

острова самых разнообразных очертаний (черт. 38). Ни один из рукавов не обладает такою устойчивостью, чтобы мог считаться коренным руслом. При паводках некоторые рукава заносятся, другие разрабаты-



Черт. 38. Участок р. Рейна вблизи г. Базеля.

ваются или образуются новые рукава. Значительная часть воды течет в толще слоев гальки, а потому иногда трудно определить даже, где собственно русло реки и где берега; не может быть, конечно, и речи о сколько-нибудь типичных формах русла в его поперечных профилях.

По мере оставления горных областей русло реки принимает уже более или менее определенные формы в своих поперечных сечениях,



Черт. 39



Черт. 39-а.

в особенности в периоды низких вод. Но русло реки, состоящее из крупных частиц гальки и гравия, находится в постоянном движении, усиливающимся при высоких паводках. Поэтому профиль дна, принявши в данном месте реки определенную форму, вскоре меняет ее на другую. Тем не менее и на таких участках уже наблюдается некоторая закономерность по отношению расположения мест больших глубин дна. Они

располагаются у берегов последовательно, по длине реки, то у правого, то у левого берега, причем у противоположного берега нагромождаются гравелистые отмели (черт. 39). С течением времени места больших глубин и отмелей не остаются постоянными. При этом на некоторых горных реках наблюдаются иногда такие явления, что в каждом месте реки отмель у одного из берегов и большие глубины у противоположного берега по прошествии некоторого времени обмениваются своим положением (черт. 40).



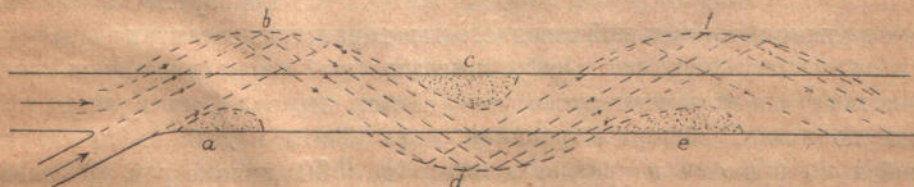
Черт. 40.

Если река течет в такой местности, где геологические и топографические условия позволяют ей разрабатывать свое русло в горизонтальных и вертикальных направлениях, то она приобретает некоторые более или менее постоянные свойства как в отношении расположения своего в плане, так и в отношении некоторых типичных деформаций русла. Такие условия свойственны обыкновенно нижним, по течению, частям реки и, в меньшей степени, также и средней части реки.

Упомянутые деформации происходят постоянно, усиливаясь в период половодья или больших паводков. Но, деформируясь на известных протяжениях, река имеет и опорные точки, ставящие границы сим деформациям и тем влияющие на самые деформации. Такими опорными точками по длине реки являются, например, скалистые гряды, пересекающие реку, которых она не в состоянии размывать, места слияния с крупными притоками, дающими большие выносы в реку, и нек. др. Эти опорные точки, оставаясь неизменными, как бы разделяют реку на участки, имеющие более или менее значительные протяжения, и регулируют пределы изменений на каждом участке.

Обращаясь к разработке русла и его деформациям отметим следующие явления.

Извилины реки и развитие ее длины. Каждая река стремится придать своему руслу извилистое очертание в плане. Стремление это



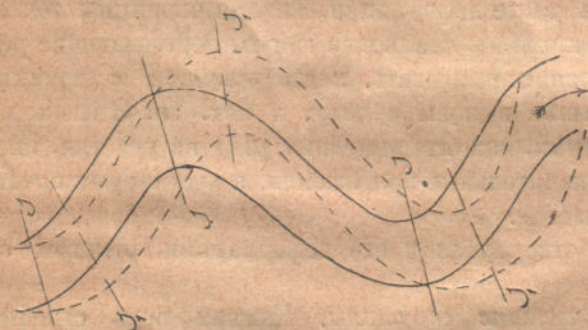
Черт. 41.

не может осуществляться только в тех случаях, когда твердые породы дна и берегов не поддаются размывам.

Действительно, представим себе поток в совершенно прямолинейном русле (черт. 41).

Всякого рода обстоятельство, как, например, впадение притока, местное повышение дна, неодинаковые качества почвы на дне в смысле сопротивления размыву и т. п., может отклонить течение от направления, параллельного берегам, и направить сосредоточенное течение к противоположному берегу. Встречая берег и делая размыв его, течение отражается к другому берегу, где производит подобное же действие. В результате получаются вогнутости последовательно то на одном, то на другом берегу. На противоположных местах, где скорости течения ослабевают, происходит складывание наносов и нарастание выпуклости берега. С течением времени размывы и наросшие части берега сопрягаются в пологие криволинейные очертания, и русло реки принимает в плане змеевидную форму. Раз создались изгибы русла, центробежная сила текущей воды по извилистому руслу способствует дальнейшему размыву вогнутых берегов и развитию извилин русла. Однако, происходить беспредельно такое развитие извилин не может. С развитием извилин река увеличивает свою длину, последствием чего является уменьшение уклона реки, а, следовательно, и средней скорости течения, которая может оказаться недостаточной для дальнейших размывов вогнутых берегов.

Вышеизложенное может служить объяснением также того обстоятельства, что большая или меньшая извилистость реки в значительной



Черт. 42.

мере зависит от геологических условий местности, по которой она течет. В широких долинах с низким равнинным дном, состоящим из древних мягких наносов ила и мелкого песка, в которых река легко может разрабатывать свое русло, она приобретает особо силь-

ную извилистость. Большой извилистостью характеризуются так называемые у нас луговые участки рек. Особо, замечательным в этом отношении, примером могут служить венгерские реки (Тисса, Драва, Сава и др.), текущие по низкой обширной равнине; река Тисса в долине, простирающейся по прямому направлению всего на 560 километров, развивает извилинами свою длину на 1.180 километров, т. е. более, чем в два раза.

Извилинам реки свойственно перемещаться медленно вниз по течению реки. При их разработке течение воды производит наибольшие

размывы берега не на середине его вогнутости, а несколько ниже (по течению) середины. Равным образом вершина нарастающей выпуклости противоположного берега образуется тоже ниже середины выпуклой линии. В результате, вершины кривизны того и другого берега постепенно переходят вниз по течению, как показано на чертеже 42-м, из положения S в положение S_1 . И таким образом происходит продольное перемещение всего русла вниз по течению реки.

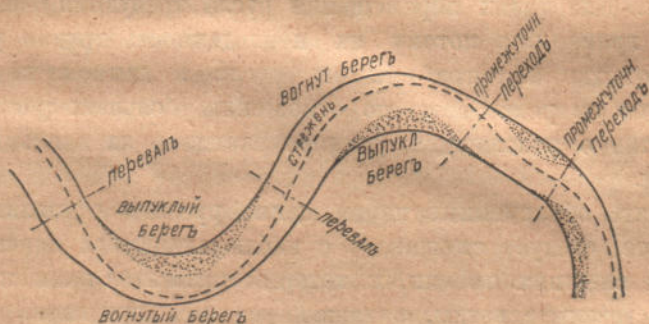
По прошествии продолжительного времени перемещение извилины может произойти на всю длину ее полуволны. Последствием сего явится такое положение русла, что в некоторых местах долины русло отойдет от одной из ее сторон к противоположной стороне, в других местах будет обратное явление. С дальнейшим течением времени начнется возвращение русла к прежним его положениям у данных пунктов берегов долины. Для таких перемещений русла требуются очень длинные промежутки времени, а потому их периодичность трудно установить. Но явления отхода или приближения русла в данном месте долины констатируются не редко даже по отношению больших рек, если, конечно, сведения о положениях реки сохранились за очень долгий период времени.

Только что объясненные перемещения русла в пределах ширины дна долины не следует смешивать с наблюдающимися перемещениями под влиянием внешних причин, к которым относятся вращение земного шара, господствующие ветры, а также реакция притоков. По закону Бера, вследствие неодинаковой скорости движения точек земной поверхности под разными широтами, меридианальные реки, текущие на юг, постепенно отклоняются в северном полушарии к западу, а в южном полушарии — к востоку. Такие вековые отклонения на запад действительно наблюдаются по отношению больших рек европейской России — Волги, Днепра и др. Тоже влиянием вращения земли объясняется передвижение русла сибирских рек (текущих на Север) с запада на восток.

Очертание берегов и формы дна русла. При однородном грунте, позволяющем реке свободно разрабатывать свое русло, наблюдается некоторая закономерность в отношении очертания берегов и форм дна ее русла. Закономерность легче подметить в реках менее значительных, чем в больших реках, где вообще явления более сложны.

Следуя извилинам реки, берега ее, как выше упомянуто, при нормальных условиях разработки русла получают очертание то выпуклых, то вогнутых кривых линий (черт. 43). Как вогнутый, так и выпуклый берега имеют каждый не одинаковую крутизну в пределах извилины реки. Начинаясь с прямолинейного очертания в переходах из одной извилины в другую, берег постепенно увеличивает крутизну своего криволинейного очертания к некоторой точке, лежащей несколько ниже, по течению, от середины извилины, где кривизна наибольшая, а затем она снова постепенно уменьшается до прямолинейного направления в месте

перехода к следующей извилине реки. Таким образом, в пределах каждой извилины радиус кривизны берегов изменяется от бесконечности, в начале ее, до некоторой наименьшей величины в упомянутой точке, а затем опять постепенно возрастает до бесконечности в конце извилины. Переход из одной извилины в другую реке бывает непосредственный, чаще — помощью короткой прямолинейной вставки. Для начертания кривых линий правильного образования естественных берегов реки предлагались разные виды кривых (синусоида, кубическая парабола, лимнискат и пр.). Для практических целей обыкновенно вычерчивают кривые естественных берегов по изгибам упругой линейки, изогнутой между тремя точками, из коих крайние соответствуют началу и концу извилины, а средняя — вершине ее.



Черт. 43.

Глубины дна в каждом естественно образовавшемся русле не одинаковы как в поперечных, так и продольных его профилях. В том и другом направлениях дно представляет пологие поверхности от мест наибольших глубин к берегам и к местам возвышения дна. Наблюдения указывают, что рельеф дна реки находится в некоторых соотношениях с очертанием русла в плане (чер. 43).

Места больших глубин находятся в извилинах реки, где они располагаются в виде вымоин или продолговатых ложбин дна около вогнутых берегов, причем к противоположному выпуклому берегу дно поднимается пологими поверхностями. Поэтому в извилинах реки поперечная профиль русла приближается к форме треугольника. Чем круче извилина, тем, обыкновенно, глубже ложбина дна и ближе она подходит к вогнутому берегу. Наибольшая глубина ложбины находится несколько впереди, по течению, от вершины вогнутого берега.

По мере приближения к месту перехода от одной извилины реки к другой соседней извилине, глубина ложбины дна уменьшается. Места этих переходов (в дальнейшем они называются *перевалами*) представляют общие возвышения дна. Линия наибольших глубин, *стресс*

реки, располагаясь в извилинах вблизи вогнутых берегов, переходит на перевалах от одного берега к другому. На длинных прямолинейных участках, представляющих так же возвышение дна, стрежень, пройдя по такой вставке в направлениях, соответствующих сложной здесь конфигурации дна, вновь приближается к вогнутому берегу следующей извилины. Таким образом, в продольной профили дно реки (черт. 44). тоже представляет изгибающуюся линию соответственно чередующихся мест больших глубин (в извилинах) и возвышений дна (на перевалах и прямолинейных вставках).

Река по своей длине как бы разделена перевалами на участки. Эта форма продольной профили дна реагирует на поверхность воды. Последняя во время межи принимает ступенчатый вид со слабыми уклонами на участках между перевалами и более крутыми уклонами на последних. Чем ниже уровень воды в реке, тем отчетливее проявляется такая ступенчатая линия поверхности воды.



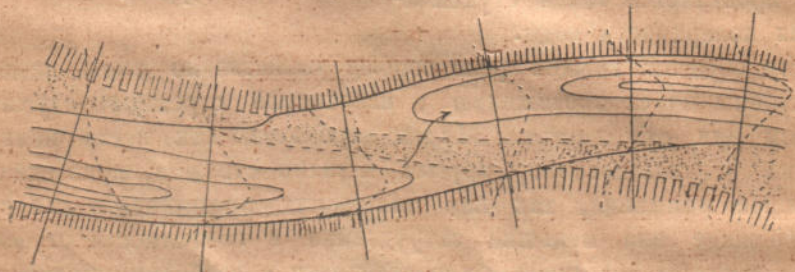
Черт. 44.

Таким образом, каждой реке вообще свойственно иметь неодинаковые глубины по ее протяжению и извилистый стрежень, служащий фарватером для судоходства. Места перевалов, как места меньших глубин дна и, обыкновенно, крутых извилин стрежня, привлекают к себе большое внимание, так как они могут представлять для судоходства большие или меньшие затруднения в зависимости от формы дна. Пока местные повышения, чередующиеся с глубокими местами, по фарватеру не препятствуют судоходству, такие повышения дна не имеют большого значения для судоходства. Но если они так велики, что глубина воды на них становится недостаточной для судов, то такие места ставят препятствия или затруднения для судоходства. Участки реки, свободные от подобных затруднительных для судоходства мест, называются у нас *плёсами*. Разделяющие плёсы места с повышенным дном, представляющим затруднения для судоходства, носят, в зависимости от происхождения и свойств, названия *перекатов* и *порогов*.

Перекаты. Как выше описано, в русле рек, состоящем из размываемых грунтов, места больших глубин чередуются с местами малых глубин. На первых происходит размыв дна и берегов, на других наносы откладываются, повышая дно. Но так как все деформации речного русла совершаются лишь в некоторых пределах, ставящих границы их развитию, то и в местах, где дно реки повышается складывающимися наносами, последние периодически испытывают обратные явления, т. е. размывы. Такие места периодического скопления и размыва наносов носят название перекатов. В зависимости от степени общей устойчивости русла реки, перекаты или сохраняют постоянно свое место в реке, или, в неустойчивом русле, перемещаются, возникая или исчезая

в разных местах реки. Согласно вышеизложенного, сила размыва потока и влечения наносов увеличивается с увеличением средней глубины потока и поверхностного уклона воды, а, следовательно, с увеличением расхода воды и скоростей течения. Это видно также из ранее приведенного выражения силы влечения $S=1000 H i$, данного Du-Boys. Поэтому работа реки по размыву русла и по складыванию наносов происходит, главным образом, в периоды половодья или сильных паводков; в это же время речная вода наиболее обогащается и теми частицами грунта, которые сносятся в реку с поверхности земли. При этом, в период половодья размыв дна происходит на тех участках реки, где ее поверхностный уклон увеличивается, а складывание наносов происходит там, где поверхностный уклон, при той же величине расхода воды, становится недостаточным для передвижения наносов.

Мы видели, что при совершенно правильном очертании русла (черт. 45) место перехода из одной его извилины в другую (перевал),



Черт. 45.

где скорости течения несколько уменьшаются, является уже местом складывания наносов и меньших глубин, а в извилинах, напротив, происходит у вогнутых берегов размыв грунта. Разные аномалии речного русла оказывают еще более значительное влияние в смысле благоприятных условий для складывания наносов в период высоких вод, а, следовательно, образования перекатов. В тех местах реки, где верхняя часть русла весьма расширяет живое сечение реки при высоких водах, скорость течения высоких вод сильно уменьшается и наносы откладываются особенно энергично.

Таковыми местами являются, например: сильные местные расширения русла; места слияния реки с большими притоками, где, под влиянием наносов (так называемых „высыпок“) из притока, меженнее течение реки прижимается к противоположному берегу и сильно разрабатывает русло в ширину. Внезапное сближение между собою высоких берегов иногда тоже оказывает влияние на образование перекатов в вышележащем участке реки, так как такое сужение, стесняя проход полых вод, вызывает подпор воды на вышележащем протяжении реки, а, сле-

довательно, уменьшение на нем поверхностного уклона и скоростей течения. Прямизна или слабая извилистость реки на большом протяжении тоже способствует образованию здесь перекатов.

По окончании периода половодья, когда расход воды резко уменьшится и уровень воды сильно понизится, происходят обратные явления. По мере спада воды, возвышенное на перекате дно реки все более и более влияет на площадь живого сечения реки и, образуя как бы подводную плотину, вызывает подпор воды на вышележащем плёсе. Вследствие сего уменьшаются в плёсе поверхностные уклоны и скорости течения, размыв дна в плёсе прекращается и даже может наступить отложение частиц, несущихся в воде, но так как в меженное время река несет их сравнительно немного, то и отложение наносов в плёсе не оказывает существенного влияния на обмеление фарватера. Вследствие того же подпора, уклон воды над самим перекатом в меженное время значительно увеличивается и скорости течения в этих местах становятся уже настолько большими, что начинается размыв наносов, отложенных ранее на перекате. Но так как при большой ширине реки в этих местах течение воды не сосредоточено, а разбрасывается, то и размыв переката происходит неравномерно, образуя в одних местах более глубокие промоины, а в других еще большее наращение наносов, так, что русло реки на перекате представляет, во время межи, массу разнообразных подводных и надводных отмелей, которые также не остаются постоянными.

Таким образом, формирование русла и движение наносов происходит при постоянной смене следующих явлений. В период половодья поверхностные уклоны становятся большими на плёсах и меньшими на перекатах; значительные глубины на плёсе поддерживаются течением или еще увеличиваются, наносы смываются, несутся течением далее и складываются на перекатах, наращивая последние. В меженное время поверхностные уклоны становятся большими на перекатах и меньшими в плёсах; поверхность воды в продольной профили реки принимает ступенчатый вид (черт. 44); перекаты несколько размываются, часть их наносов продвигается в плёсы, где с новым половодием наносы вновь смываются и относятся далее. Продвижение наносов вдоль реки к ее устью происходит, следовательно, как бы этапами, главным образом, в периоды половодья.

Формы, в которые складываются и разрабатываются наносы на перекатах, чрезвычайно разнообразны. Перекат, обыкновенно, образуется соединением двух кос или отмелей, начинающихся у противоположных берегов. Результатом их соединения является как бы широкий песчаный порог, пересекающий русло по косому направлению (черт. 45). Линия наибольших глубин на перекатах крайне извилиста, она то приближается к одному из берегов, то удаляется от него, делая крутые повороты. Пользование таким стремнем затруднительно для судоходства тем более,

что на нем бывают часто малые глубины при значительных и неправильных скоростях течения. По линии стрежня ширина глубокой части постепенно суживается к гребню переката, за которым опять расширяется. Иногда образуется несколько гребней перекатов, что еще более затрудняет движение судов. Под влиянием размывов, гребни переката иногда перемещаются вниз по течению и постепенно смываются, но, взамен их, появляются с верховой стороны новые наростания косы и, таким образом, на некоторых перекатах наблюдается как бы цикл перемещения переката в определенных по длине границах, занимающий несколько лет времени.

На чертеже 46 показан, в горизонталях, рельеф дна на одном из простейших перекатов.

Большинство наших рек, протекающих в ровных местностях, имеют на своем протяжении перекаты в большем или меньшем количестве, более или менее затруднительные для судоходства. На реке Волге, которая в России служит важнейшим внутренним водным путем сообщения, на протяжении от Рыбинска до Астрахани, насчитывают



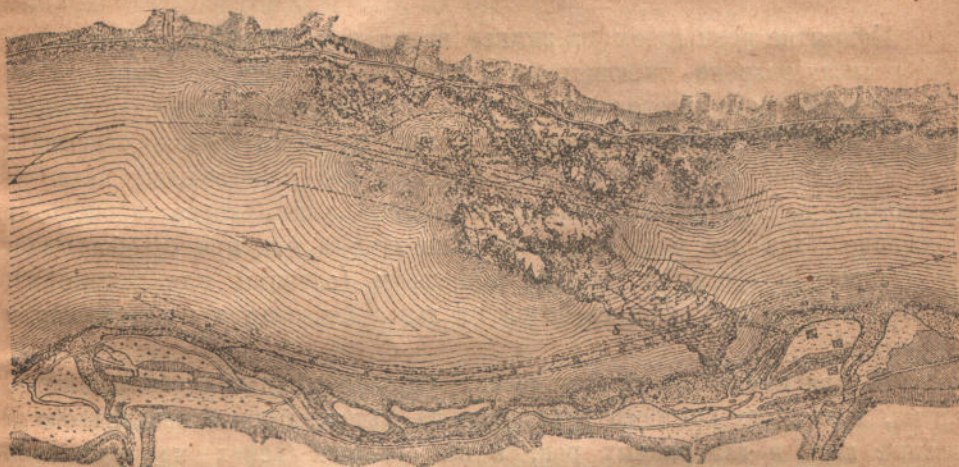
Черт. 46.

до 370 перекатов, ощутительных для судоходства при современных размерах судов. Перекаты на некоторых реках располагаются группами, сосредоточиваясь в тех или иных частях реки по ее длине.

Постоянство расположения перекатов на одних и тех же местах, деление русла на глубоководные плёсы и мелководные перекаты и прочие объясненные свойства их присущи, как сказано выше, рекам с *устойчивым* руслом. Но если качества грунта русла по сопротивляемости действию течения, а также свойства реки в отношении ее уклонов и скоростей течения находятся в таком между собою

соотношении, что поверхностные уклоны являются достаточными для сплошного и безостановочного влечения наносов без периодического отложения их где либо по недостатку силы влечения, то река приобретает состояние *неустойчивое*, характеризующее повсеместным размывом ложа и берегов и непрерывным вдоль по всему руслу массовым влечением наносов.

Пороги. Под этим наименованием разумеются, обыкновенно, такие места в реке, где твердое неразмываемое дно расположено ступенчато или с более или менее крутым уклоном и усеяно выступами и крупными камнями. В таких местах на сравнительно коротком протяжении сосредоточивается довольно большое падение поверхностного уклона реки, течение воды становится крайне неравномерным и быстрым с водоворотами, местными скачками и перепадами. Здесь судоходство или вовсе невозможно, или терпит большие затруднения. Иногда такие затруднительные места разделяют реку на отдельные, возможные для судоходства, плёсы реки.



Черт. 47. Порог „железные ворота“ на р. Дунае.

Некоторые пороги представляют остатки некогда бывших водопадов, постепенно сгладивших вертикальный уступ скалистой породы.

Полагают, что такое происхождение имеют известные Петропавловские пороги на реке Волхове, где на протяжении около 9 верст падение поверхности воды составляет около 4,5 саж.; русло реки представляет собою как бы каменный лоток, испещренный уступами и другими неровностями скалистого дна.

В других случаях пороги образуются на местах пересечения реки каменистыми грядами, которые она не была способна размыть с такою же равномерностью, как в прилежащих плёсах. На этих местах имеются в русле реки выступы из твердых пород, в виде или целых гряд, или отдельных камней.

Такие пороги образуют подпор воды на вышележащем участке реки, где поверхностный уклон и скорость течения уменьшаются; на самом же пороге течение реки происходит неправильными и быстрыми потоками. Подобный вид имеют замечательные Днепроовские пороги, расположенные в разных местах реки между городами Екатеринослав и Александровск. На протяжении 75 верст порожиистой части реки падение ее составляет около 15 саж., причем падение это сосредоточивается, главным образом, на 9-ти порогах, разделенных плёсами; так, например, в самом большом пороге („Ненасытец“) падение 2,4 саж. сосредоточено у правого берега на протяжении около $2\frac{1}{2}$ верст; сравнительно малые пороги носят там название *заборы*.

Замечательные пороги находятся также на реке Дунае. Один из крупнейших дунайских порогов, носящий название „Железные ворота“, показан на черт. 47.

§ 9. Лед и его движение.

Покрытие реки льдом на зимнее время и движение льда принадлежат к числу явлений, имеющих существенное значение для судоходства, для всякого рода возводимых в реке сооружений и даже для самого русла реки в смысле влияния, какое на него может оказывать лед. Состояние реки, когда она находится под неподвижным ледяным покровом, называется *ледоставом*; состояние реки, когда происходит движение льда по реке перед ее замерзанием или при освобождении от ледяного покрова, называется *ледоходом* (осенним или весенним). Период года, когда река свободна от льда, называется *навигационным периодом*.

В зависимости от климатических условий и других обстоятельств, время, в течение которого река покрыта льдом, бывает неодинаково в разные годы и для разных рек, а на больших реках не одинаково для различных участков.

В южной полосе Европейской России реки покрываются льдом на 2—4 месяца, в средней—на 4—5 месяцев, а в северной—на 6 и более месяцев.

На крайнем севере России реки покрываются льдом на большую часть года. Так, например, р. Печора, р. Лена и др. северные реки в своих устьях освобождаются от льда лишь в июне месяце, а в сентябре снова замерзают.

Под одной и той же широтой, реки вскрываются ранее на западе, чем на востоке России.

Малые реки замерзают и вскрываются ранее, чем большие.

Толщина ледяного покрова бывает весьма различна. В среднем, она колеблется от 1—2 футов на реках южной полосы России, до 3—5 футов в северной полосе. Но в разные зимы и при разных

условиях лед достигает не одинаковой толщины. Это обстоятельство зависит не только от силы и продолжительности морозов, но и от многих других причин. При равных прочих условиях толщина снежного на льду покрова, как обладающего меньшей теплопроводной способностью, оказывает заметное влияние; при отсутствии снега толщина льда достигает большей величины; чем больше снегу на льду, тем труднее нарастание последнего в глубину. В местах реки, где скорости течения большие, толщина образующегося льда меньше. Иногда в местах слабых скоростей и малой глубины на северных небольших реках происходит промерзание воды до самого дна, причем поток прорабатывает себе под льдом более глубокий ход в какой-либо части своей ширины, вынося размытый грунт и складывая его в русле, чем нередко засоряется фарватер. В местах больших скоростей, как, например, на порожи́стых участках реки, иногда образуются непокрытые льдом площади, так называемые *по́лыни* более или менее значительной величины.

Условия замерзания рек весьма отличны от условий замерзания стоячей воды, например, прудов или небольших озер, на которых не может происходить значительного волнения. Река замерзает позднее. Причины заключаются в том, что при низкой температуре воздуха охлаждение верхних слоев стоячей воды до температуры замерзания происходит скорее. В реке, как показали наблюдения, температура воды по всей глубине потока почти одинакова, так как частицы воды в текущей воде постоянно перемешиваются; поэтому, для охлаждения воды на поверхности требуется гораздо больше времени действия морозного воздуха.

Замерзанию реки предшествуют длительные морозы. Оно начинается с образования у берегов припаянных к ним тонких льдин. Течением воды льдинки отрываются от берегов и сносятся к стрежню. При продолжающемся морозе число их быстро возрастает, поверхность воды покрывается массой таких движущихся льдинок; образуется так называемый „шорох“ или „сало“. В дальнейшем льдинки срастаются между собою и нагромождаются одна на другую, пока движущийся, таким образом, по всей ширине реки лед не остановится, образовавши сплошную ледяную кору, которая в дальнейшем нарастает по своей толщине.

На некоторых реках перед образованием ледостава наблюдаются явления образования так называемого *донного льда*. При низкой температуре воздуха на еще непокрытой льдом поверхности воды, обыкновенно в ясные солнечные дни, внезапно выплывают снизу вверх крупные, неправильной формы глыбы рыхлого, с большими порами льда зеленовато-желтого цвета, который быстро обращается в белоснежный цвет, вследствие вытекания воды из пор той части льда, которая возвышается над поверхностью воды. Исследования показали, что донный лед образуется, главным образом, на скалистом или вообще твердом грунте дна, или же на неподвижных камнях и других предметах. Образование донного льда происходит весьма быстро, причем губчатый

лед облепляет подводные предметы большими массами. Всплывание донного льда в больших количествах служит нередко началом ледостава, причем первоначальный ледяной покров образуется от смерзания между собою, а затем и отвердения в плотную массу таких ледяных глыб.

Образование донного льда в местах реки, уже покрытых ледяным покровом, не происходит. Но нередко в период образования и всплытия донного льда его так много, что текущая вода на всю глубину заполнена рыхлым мягким льдом, обращаясь как бы в жидкую кашу. В таком виде вода течет далее под льдом и в местах реки с уже образовавшимся ледяным покровом.

При низком стоянии уровня воды в реке ледостав образуется скорее и с более равномерной толщиной покрова, чем при высоком уровне. Процесс образования ледостава на каком-либо участке реки часто сопровождается быстрым подъемом воды как на месте образовавшегося покрова, так и на некотором протяжении вышележащей части реки. Ниже места образовавшегося ледостава уровень воды, напротив, несколько понижается. Подъем уровня воды достигает иногда 0,20 и даже до 0,5 саж. Одновременно значительно увеличиваются и поверхностные уклоны воды. По мере окончания образования ледостава на значительном протяжении реки упомянутые явления постепенно прекращаются.

Явления эти объясняются следующими причинами. Вступая в участок, покрытый льдом, вода встречает большее сопротивление течению, так как на поверхности своей она вместо воздуха имеет лед. Поэтому для пропуска такого же расхода воды требуется большая площадь живого сечения, которая и увеличивается за счет подъема уровня воды. Необходимость иметь соответствующий напор воды вызывает подъем уровня воды и на вышележащем свободном от льда участке реки. Поэтому высота падения реки, а, следовательно, и уклон поверхности воды увеличиваются.

В период ледостава толщина ледяного покрова постепенно увеличивается. Однако часто наблюдается, что у берегов толщина льда значительно меньше, чем в остальной части ширины реки; иногда вдоль берега образуются даже полыньи более или менее длинные и широкие. Происходит это от разницы температур речной воды и грунта берега, от непрерывающего выхода в реку ключей из грунта около берега и по другим причинам. Для увеличения толщины льда около берега, что, например, бывает нужным для прокладки зимнего пути через реку, прибегают к поливке воды на лед в морозные дни с целью нарастить толщину льда сверху.

Вскрытие реки от льда наступает, обыкновенно, только весною, когда под влиянием теплоты ледяной покров ослабнет. Чем плотнее образовался лед зимою, тем позднее наступает вскрытие реки:

При слабом льде и продолжительном временном повышении температуры воздуха бывает иногда вскрытие реки на более или менее длинных ее участках и зимою, после чего она вновь замерзает до весны. Такие явления, впрочем, наблюдаются только в более южных местностях. Вскрытию реки, обыкновенно, предшествуют сплошные подвижки (сдвиги) ледяного покрова участками значительного протяжения, до 10 и даже 20 верст. От сдвига образуется на верхнем конце полынья, иногда небольшая, иногда же в несколько верст длины. Сдвиг ледяного покрова вызывает перераспределение продольных поверхностных уклонов воды. Так как и таяние снега на берегах и вскрытие притоков начинаются ранее, то вскрытию реки предшествует более или менее значительный подъем уровня воды в реке.

Когда ледяной покров станет настолько слаб, или если изменения уклонов на коротких протяжениях станут настолько велики, что образуется в ледяной коре внезапно много трещин и она разделится на куски, то начинается общее беспорядочное их движение — *ледоход*. При препятствиях своему движению льдины нагромождаются одна на другую. Разламывая ледяную кору нижележащих участков ледоход распространяется вниз по течению на все большее и большее протяжение. Во время ледохода уровень воды в реке обыкновенно быстро поднимается и достигает значительной высоты. На низких берегах и островах образуются нагромождения льдин, которые иногда остаются там до полного своего растаивания. Распространение ледохода вниз по течению реки с одновременным подходом льдин сверху реки не вызывает, однако, такого обстоятельства, чтобы нагромождения льдин и другие явления при ледоходе все более и более усиливались с течением времени и по мере распространения ледохода вниз по реке. Напротив, вследствие уменьшающихся по длине реки поверхностных уклонов, более спокойного течения и увеличивающейся ширины реки, обыкновенно явления ледохода смягчаются в ниже расположенных частях реки. А, если и происходят чрезвычайные местные нагромождения льда, при так называемых ледяных зажорах, то причины образования их иные, о чем будет сказано ниже. На больших реках, текущих с севера на юг, вскрытие от льда происходит в низовьях ранее, чем в средней части реки и в ее верховьях.

Явления, происходящие как при ледоставе, так и при ледоходе, во многих случаях очень опасны для находящихся в реке судов и для всякого рода сооружений; для устранения вредных последствий необходимо принимать соответственные предохранительные меры.

В зимнее время колебания уровня воды хотя и менее значительны, чем в прочее время, но все же происходят. Весною сильный подъем воды наступает часто еще до вскрытия реки. Если части сооружения крепко смерзлись с ледяной корой, то при подъеме последней свайные опоры могут оказаться приподнятыми или вытягиваемыми из

дна, выступающие части повреждаются или обламываются и т. п. Судно, смерзшееся с ледяным покровом реки, испытывая снаружи большие давления от расширения льда, может получить повреждения и течь. Во избежание сего, необходимо в течение зимы окалывать лед вокруг сооружения и судна, по периметру, хотя бы на небольшую ширину.

При образовании из донного льда шороха, заполняющего иногда реку на большую глубину, расход воды в реке, как выше уже сказано, бывает гораздо меньше величины расхода при том же положении уровня в свободное от льда время. Но, кроме того, быстрое обмерзание донным льдом подводных частей сооружения влечет за собою иногда опасные последствия или большие затруднения. Так, например, обмерзание приемных для воды отверстий труб паровых механизмов или турбинных приемников в гидроэлектрических станциях, приемных труб на водопроводных станциях и т. п. прекращает всасывание воды. Для устранения таких закупорок возможно применение согревающего действия пара или электрического тока, так как, согласно опытов, требуется весьма малое увеличение температуры для отделения прилипших глыб донного льда. Наконец, донный лед может служить причиной образования в реке зажоров со всеми опасными от них последствиями.

Ледоход, как весенний, так и осенний, представляет особо большие опасности и для судоходства и для всякого рода речных сооружений.

Быстрое движение тонких, но острых льдин при осеннем ледоходе представляет опасность в том отношении, что таким льдом быстро истираются поверхности деревянных частей, как например, свай, деревянных обшивок судов и сооружений и т. п. В качестве мер для предохранения от таких истираний применяют обшивку железными листами, набивку широкошляпных гвоздей и проч. Весенний ледоход большими толстыми и крепкими льдинами способен разрушать сооружения в местах реки, где лед течением и ветром особенно сильно напирает и нагромождается. Судно, стоящее в таком месте, где оно не защищено от ледохода, может быть раздавлено, срезано пополам и вообще погублено. Поэтому, еще до наступления осеннего ледохода необходимо отводить все суда в зимовочные гавани или иные места, естественно защищенные от ледохода, где они и остаются на всю зиму до минования весеннего ледохода. Постоянные сооружения, как напр., мостовые опоры, постоянные пристани и т. п., снабжаются ледорезными частями, или отдельно от них стоящими ледорезами, принимающими на себя удары льдин, разламывающие льдины и направляющие их в сторону, как напр., в отверстия мостов. Полезно, до вскрытия льда, сделать выше сооружения проруби в ледяном покрове для деления его на мелкие части. Но самым главным условием для предохранения сооружений от ледохода является правильное расположение сооружений,

придание достаточных отверстий для пропуска ледохода, причем нередко встречается надобность и в общем регулировании реки на некотором протяжении помощью выправительных сооружений.

Ледяные зажоры или, как их иногда называют, *заторы* составляют особо грозные явления на реках. Если по каким-либо причинам лед встречает местное препятствие своему движению во время ледохода, то ледяные массы скопляются, останавливаются и, загромождая в данном месте всю ширину реки, преграждают путь для свободного прохода льдин. Подходящие льдины, под влиянием скорости своего движения и напора сзади идущих льдин, взгромождаются одна на другую, причем ледяная масса постепенно увеличивается в глубину реки и над ее поверхностью. В результате, все живое сечения реки, до ее дна, может оказаться забитым льдом, который к тому же смерзается. Образовавшаяся таким образом ледяная плотина во всю ширину реки, занимающая иногда несколько верст по длине реки, преграждает течение воды и вызывает подпор ее в вышележащем участке реки, иногда значительный (до 1—2 и более фаж.), причем происходит наводнение прибрежных местностей. Если зажор образовался в месте реки с высокими и крутыми берегами, состоящими из твердых пород, то увеличение подпора продолжается до тех пор, пока силой давления воды и огромными скоростями течения, пробивающегося в порах ледяного заграждения и по верху его, начнутся прорывы плотины. В таком случае вода вместе со льдинами устремляется вниз по течению и может производить разрушительное действие на пути своего движения. Если на месте образовавшегося зажора берега не высоки, а грунт дна и берегов реки мягкий, то вода, поднявшись на известную высоту, размывает дно реки и, обходя зажор по прилегающим прибрежным местам, размывает там для себя глубокие и широкие протоки, вынося размывтый грунт и складывая его в русле реки.

Зажоры могут происходить как от свойств русла, так и от причин случайного характера. Все те условия речного русла, которые вызывают затруднения для ледохода и скопления льда, могут в более неблагоприятных случаях служить причиной образования зажора. Таковы, например, крутые извилины реки, засорения русла обвалами берегов, отмели, местные сужения реки, пороги и т. п. Образованию зажоров благоприятствуют условия вскрытия северных рек, текущих с юга на север, на которых вода глубоко промерзает, иногда до самого дна. Ледяные зажоры могут являться, как последствия неудачного расположения возводимых в реке искусственных сооружений; недостаточная ширина пролетов между мостовыми опорами, выдвинутые далеко в реку дамбы и всякие другие несообразные с силой и условиями ледохода сооружения, вызывая скопление льда, могут стать причиной образования более или менее значительных зажоров. Мерой устранения образования зажоров от неблагоприятных естественных условий речного

русла и течения служит регулирование реки и устранение препятствий для свободного движения льда. В случаях же образования зазора, меры, которые применяются для устранения или смягчения опасных его последствий, носят палиативный характер и сравнительно редко достигают свою цель. С этой целью иногда производят в начале образования зазора взрывы ледяной массы динамитом или другими взрывчатыми составами; полезных результатов иногда достигает работа крепких пароходов, которые снизу образующегося зазора врезаются на ходу в ледяную массу, отделяя тем самым ее куски для постепенной разломки зазора; конечно, такая работа возможна при сравнительно еще небольшом подпоре воды, иначе она становится очень опасной и для самих пароходов.

На замерзающих реках судоходство, обыкновенно, вовсе прекращается на все зимнее время. Попытки устройства в ледяном покрове канала помощью вырубки льда ручным способом и взрывами не увенчались успехом, вследствие трудности поддержания такого канала. Более успешные результаты дает применение особого типа пароходов, так называемых пароходов-ледоколов, помощью которых на некоторых участках реки удастся продлить навигацию или поддерживать ее даже всю зиму.

